



Universidad de  
Oviedo



# **ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN**

## **MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

### **ÁREA DE ENERGÍA**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER Nº 18010117**

**RETROFIT DE CALENTADOR DE GAS EN LA CENTRAL  
TÉRMICA DE ABOÑO**

**D. GARCÍA ÁLVAREZ, Javier**

**TUTOR en la empresa: Dña. Vanessa Hernández Rodríguez  
TUTOR académico: Dña. Manuela Alonso Hidalgo**

**Julio 2018**

## Índice general

1. Introducción	1
1.1.- Empresa EDP y la CT de Aboño	1
1.2.- CT ABoño 2	2
2. Justificación del proyecto	4
3. Planta desulfuradora (FGD)	7
3.1.- Proceso de desulfuración	7
3.2.- Magnitudes principales del proceso	9
3.3.- Procesos y sistemas principales	11
3.4.- Equipo GGH	14
4. Brazo de limpieza	21
4.1.- Modos de limpieza	23
4.2.- Problemática	24
5. Análisis de soluciones	29
5.1.- Brazo de limpieza retráctil	29
5.2.- Brazo de limpieza telescópico	31
5.3.- Brazo de limpieza de rastrillo	31
5.4.- Sistema de limpieza acústico	33
6. Desarrollo de la solución	35
6.1.- Descripción de la solución	35
6.2.- Modos de limpieza	36
6.3.- Circuito de aire y agua a presión	43
6.4.- Sistema de control del soplador	48
7. Estructura	50
8. Valoración económica	53
8.1.- Presupuesto general	53
8.2.- Análisis de viabilidad	55
9. Conclusiones	59
10. Referencias	60
10.1.- Referencias bibliográficas	60
10.2.- Páginas web consultadas	60
10.3.- Referencias legales y normativas	60
11. Anexos	62

## Índice de imágenes

Imagen 1.1. Central térmica de Aboño (Vista satélite en 3D de Google Maps)	2
Imagen 3.1. Esquema del tanque absorbedor	8
Imagen 3.2. Esquema general de la planta desulfuradora	9
Imagen 3.3. Control de la planta desulfuradora desde el DCS	13
Imagen 3.4. Intercambiador de calor GGH	14
Imagen 3.5. Principio de funcionamiento del GGH	16
Imagen 3.6. Rotor y cestas del GGH	17
Imagen 3.7. Mecanismos de ajuste de sellado del rotor	18
Imagen 3.8. Disposición de las cestas del GGH	19
Imagen 3.9. Elementos de constitución del GGH	20
Imagen 4.1. Brazo de soplado del GGH	21
Imagen 4.2. Brazos de limpieza	22
Imagen 4.3. Movimiento del brazo de limpieza	23
Imagen 4.4. Evolución de la dP en las cestas del GGH	27
Imagen 5.1. Ejemplo de brazo de limpieza retráctil	30
Imagen 5.2. Ejemplo brazo de limpieza con cabezal en forma de rastrillo	32
Imagen 5.3. Ejemplo de sistema de limpieza acústico	34
Imagen 6.1. Funcionamiento de la lanza del soplador Enerjet	36
Imagen 6.2. Variables para cálculo de tiempos GGH	37
Imagen 6.3. Avance boquilla soplador	38
Imagen 6.4. Tiempo en recorrer Y en función del radio	42
Imagen 6.5. Tren de válvulas actual del circuito de aire-agua	44
Imagen 6.6. Modificaciones a la instalación existente sobre los planos del Anexo 2	46
Imagen 6.7. Modificación del circuito de aire y agua	47
Imagen 7.1. Disposición de los principales equipos del sistema de humos	50
Imagen 7.2. Disposición en planta de estructuras en zona de chimenea	51

## Índice de tablas

Tabla 2.1. VLE asignados a ambos grupos de la central térmica	4
Tabla 3.1. Principales magnitudes del sistema	11
Tabla 4.1. Historial de OTs y lavados 2008-2016	26
Tabla 6.1. Cálculos vueltas GGH	41
Tabla 8.1. Presupuesto general	54
Tabla 8.2. Lavados realizados en el período 2012-2016	55
Tabla 8.3. Costes asociados al mantenimiento en el periodo 2012-2016	56
Tabla 8.4. Resumen de costes asociados al GGH	57

## Índice de abreviaturas

BAT: Best Available Technique	GO: Gas-Oil
BATAEL: BAT Associated Emission Levels	HP: High Pressure
BREF: BAT REference documents	MCO: Mecánico
CEE: Comunidad Económica Europea	MNT: Mínimo Técnico
CTA: Central Térmica de Aboño	OT: Orden de Trabajo
DEI: Directiva sobre Emisiones Industriales	PCS: Poder Calorífico Superior
dP: Caída de presión	PEM: Puesta En Marcha
ECI: Electrónica e Instrumentación	PNRE: Plan Nacional de Reducción de Emisiones
FGD: Fuel Gas Desulfurization	PNT: Plan Nacional Transitorio
FO: Fuel-Oil	RD: Real Decreto
GGH: Gas Gas Heater	RFC: Revisión Fin de Campaña
GHA: Gas de Horno Alto	TFM: Trabajo Fin de Máster
GIC: Grandes Instalaciones de Combustión	Th: Termia
GN: Gas Natural	VLE: Valores Límite de Emisión

## Resumen

*En la actualidad el correcto uso y gestión de la energía es una actividad fundamental para el desarrollo de la sociedad, en la que intervienen todos los agentes sociales. Este Trabajo Fin de Máster aborda la problemática de un equipo en particular de la central térmica de Aboño, desde varios puntos de vista: técnico, normativo, operativo y económico, con el objetivo final de mejorar la eficiencia de la central y reducir las emisiones de SO<sub>2</sub>.*

*El trabajo ha sido desarrollado en su totalidad durante la estancia de prácticas en la propia central térmica de Aboño, y corresponde a la finalización de los estudios universitarios por parte del autor.*

**Palabras clave:** Retrofit, Central Térmica, Energía, GGH, Soplador, Desulfuradora.

## Abstract

*Nowadays the correct use and management of energy is a fundamental activity for the development of society, in which all social agents intervene. This Master's Thesis addresses the problems of a particular equipment at the Aboño power plant, from various points of view: technical, regulatory, operational and economic, with the ultimate goal of improving the plant's efficiency and reducing SO<sub>2</sub> emissions.*

*The Thesis has been fully developed during the internship at the Aboño power plant and corresponds to the finalization of the studies by the author.*

**Key words:** Retrofit, Power Plant, Energy, GGH, Sootblower, Desulphurizer.

# 1. Introducción

El presente Trabajo Fin de Máster se centra en el diseño e implantación de mejoras en el intercambiador de calor GGH (Gas-Gas-Heater) de la planta desulfuradora del Grupo II en la central térmica de Aboño.

## 1.1.- EMPRESA EDP Y LA CT DE ABOÑO

EDP es una empresa global de energía con una potencia instalada en España cercana a los 4.000 MW en régimen ordinario y más de 2.000 MW en régimen especial, supera los 10.000 GWh generados en sus centros de producción de energía eléctrica en diferentes comunidades autónomas. EDP cuenta con una cartera comercial de más de dos millones de clientes repartido por toda España, con un volumen de comercialización que supera los 21.000 GWh de electricidad y los 27.000 de gas natural, con oficinas comerciales repartidas por las principales ciudades del país.

El Grupo también tiene una importante presencia en el segmento de las energías renovables a través de su filial EDP RENOVABLES; es uno de los operadores de referencia mundial de energía eólica, con presencia en doce países y sede social en España, donde supera los 2.310 MW de potencia instalada.

La Central Térmica de Aboño (CTA) está situada en el valle del mismo nombre, entre los municipios de Gijón y Carreño, a dos kilómetros del puerto del Musel, y dispone de un enlace, mediante cinta transportadora, con el parque de carbones de Aboño.

Posee dos unidades generadoras:

- Aboño 1 (Grupo I), de 365,5 MW de potencia, puesta en servicio el 15 de marzo de 1974.
- Aboño 2 (Grupo II), de 556,2 MW de potencia, puesta en servicio el 23 de septiembre de 1985.

Los dos grupos fueron diseñados para utilizar como combustibles principales carbón (aproximadamente aporta un 70% de la potencia calorífica total) y gases siderúrgicos

excedentes de la factoría de ArcelorMittal en Veriña (supone aproximadamente un 30% de la potencia calorífica total). Como combustibles auxiliares, se empleaban GO (para encendido) y FO (para apoyo en carga y arranques).

En 2018, en Aboño 2, se han instalado 12 quemadores de GN que se empleará como combustible para arrancar y apoyo en carga, con los cuales, se ha eliminado totalmente el empleo de FO.

Por la potencia de sus grupos y la variedad de los combustibles que utiliza, la central térmica de Aboño es una de las más singulares, tanto a nivel nacional como internacional.



Imagen 1.1. Central térmica de Aboño

## 1.2.- CT ABOÑO 2

Dado que el presente Trabajo Fin de Máster se centra en un equipo perteneciente a la planta desulfuradora del Grupo II, a continuación se citan algunos de los datos técnicos más relevantes de dicha unidad:



- Generador de vapor (caldera)

Quemadores: 48 quemadores de pared, distribuidos entre la pared frontal (calderín) y posterior (nariz de hogar), 36 quemadores combinados cuyo combustible principal es carbón con GN +GO como combustible para arranque/apoyo y 12 quemadores cuyo combustible principal es GHA con GO como combustible para arranque/apoyo

Circulación natural, con calderín único

Con recalentador intermedio

Capacidad de 1.725 Tm/h de vapor sobrecalentado a 168 bar y 540 °C

Capacidad de 1.465 Tm/h de vapor recalentado a 41 bar y 540 °C

Rendimiento: 87,7 %

- Grupo turboalternador

Turbina de 4 cuerpos, tipo tándem de condensación, con recalentamiento y 8 extracciones

Alternador refrigerado por hidrógeno y por agua

Condiciones del vapor a la entrada: 167 bar y 538 °C

Tensión de generación: 19.000 V

Excitación estática por tiristores

Potencia aparente del grupo: 639.000 V



## 2. Justificación del proyecto

El Estado Español, mediante el Real Decreto 430/2004, de 12 de marzo, opta por establecer un plan nacional de reducción de emisiones para las grandes instalaciones de combustión existentes. Este Real Decreto transcribe la directiva de Grandes Instalaciones de Combustión (GIC) 2001/80/CE aprobada por la Comunidad Económica Europea. Dicha normativa y sus actualizaciones posteriores limitan las toneladas emitidas a la atmósfera de ciertos gases, como son el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y partículas sólidas de pequeño tamaño.

Dada la organización del Estado Español, las competencias en materia medioambiental están transferidas a las comunidades autónomas. De esta forma, la norma a la que han de acogerse las grandes instalaciones de generación de electricidad en Asturias, la cual transcribe el RD 430/2004, es la Autorización Ambiental Integrada de 2008 (AAI).

Emisión	Aboño 1	Aboño 2
SO <sub>2</sub>	1600	484
NO <sub>x</sub>	650	650
Partículas	100	50

Tabla 2.1. VLE asignados a ambos grupos de la central térmica

NOTA: Los valores indicados en la tabla anterior se miden sobre seco, en condiciones normales (N) de presión y temperatura, y con un 6 % de O<sub>2</sub> en los humos.

Del mismo modo, existen a nivel europeo otros documentos específicos en materia ambiental los cuales inciden sobre la aplicación de las mejores técnicas disponibles (llamados BAT, de su acrónimo en inglés: *Best Available Techniques*). Estos documentos, que no son de obligado cumplimiento, se recogen en un documento de referencia llamado BREF (*Bat REFErence documents*), del cual a su vez se deriva otro llamado BATAEL (*BAT Associated Emission Levels*), que indica los VLE obtenidos de todos los BAT. Las directivas recogidas en el BREF son:

- Directiva 78/176/CEE del Consejo, de 20 de febrero de 1978, relativa a los residuos procedentes de la industria del dióxido de titanio

- Directiva 82/883/CEE del Consejo, de 3 de diciembre de 1982, relativa a las modalidades de supervisión y de control de los medios afectados por los residuos procedentes de la industria del dióxido de titanio
- Directiva 92/112/CEE del Consejo, de 15 de diciembre de 1992, por la que se fija el régimen de armonización de los programas de reducción, con vistas a la supresión, de la contaminación producida por los residuos de la industria del dióxido de titanio
- Directiva 1999/13/CE del Consejo, de 11 de marzo de 1999, relativa a la limitación de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles debidas al uso de disolventes orgánicos en determinadas actividades e instalaciones
- Directiva 2000/76/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de diciembre de 2000, relativa a la incineración de residuos
- Directiva 2001/80/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2001, sobre limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión
- Directiva 2008/1/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de enero de 2008, relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación

Dado el gran volumen de normativa que es objeto de aplicación, y siendo consciente de su complejidad, la Unión Europea publica la Directiva sobre Emisiones Industriales (DEI) 2010/75/UE que entra en vigor en 2016 en donde se recogen las directrices del BREF y BATAEL, estableciendo que han de ser revisados cada 4 años, al igual que las AAI, las cuales quedan supeditadas a éstas.

Sin embargo, se contemplan una serie de medidas para flexibilizar el cumplimiento de los nuevos VLE por parte de las instalaciones existentes, lo que permite un periodo de adaptación y de decisión sobre nuevas inversiones. Entre estos mecanismos, está el Plan Nacional Transitorio (PNT), estando abierta esta posibilidad para las instalaciones con permisos anteriores a noviembre del 2002, y para los contaminantes SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y partículas.

Este plan es una opción similar al Plan Nacional de Reducción de Emisiones (PNRE) que actualmente está vigente en España, que permite reemplazar la exigencia de cumplir

instalación a instalación los valores límite de emisión recogidos en la DEI, por el funcionamiento conjunto de todas ellas en unas “burbujas” donde el efecto global sea equivalente, es decir, que las toneladas emitidas en cada contaminante sean las mismas que si se exigiesen los límites individuales a cada instalación.

Respecto al cálculo de las burbujas de cada país, éstas se definen como la suma de las aportaciones de cada una de las plantas acogidas al Plan. Estas aportaciones individuales se estimarán considerando el funcionamiento promedio de cada instalación en el periodo 2001-2010, siendo el volumen de humos emitidos en condiciones normales ( $\text{Nm}^3$ ) el parámetro representativo de este funcionamiento. Así, para cada contaminante, el producto de la media del volumen de humos ( $\text{Nm}^3$ ) por el VLE ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ) correspondiente nos dará la contribución de la planta a la burbuja nacional. Este PNRE tiene una duración limitada entre enero 2016 y junio de 2020, y las burbujas son decrecientes de forma lineal (la burbuja de  $\text{SO}_2$  se reduce a la mitad entre 2016 y 2019).

## 3. Planta desulfuradora (FGD)

A fin de reducir el impacto medioambiental de la central térmica de Aboño y dar cumplimiento a los VLE ambiental en cuanto a  $\text{SO}_2$  establecidos por la normativa existente, en el año 2007 se pone en servicio la planta desulfuradora, optándose por la opción de desulfuración por vía húmeda y oxidación forzada, empleando caliza como reactivo y obteniendo yeso como subproducto.

### 3.1.- PROCESO DE DESULFURACIÓN

El proceso de desulfuración consiste en reducir e incluso llegar a eliminar la concentración de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), ácido clorhídrico (HCl), ácido fluorhídrico (HF) y hasta cierto punto el  $\text{SO}_3$  de los humos que se producen en la caldera tras el proceso de combustión. La desulfuración de los gases de combustión se realiza mediante un tanque absorbedor, donde el dióxido de azufre se transforma en yeso gracias a la adición de caliza, agua y oxígeno. El sistema no sólo permite reducir la emisión de dióxido de azufre, sino que permite también una importante reducción de la cantidad de partículas arrastradas por los gases.

Los humos de combustión provenientes de los precipitadores electrostáticos, que son impulsados por los dos ventiladores de tiro inducido, entran en el sistema de desulfuración a través de las compuertas de aislamiento. Un intercambiador de calor (GGH) enfría los humos antes de su entrada en el absorbedor. El calor que toma de los humos se utiliza para calentarlos de nuevo a la salida, cuando se envían a la chimenea.

Los humos enfriados, que salen del GGH, se introducen en el absorbedor, que es del tipo torre pulverizadora abierta, con cuatro niveles de duchas. La lechada de caliza (caliza disuelta en agua) se recircula en el absorbedor mediante cuatro bombas de recirculación (una por cada nivel). El dióxido de azufre y las partículas de los gases son retenidas en esta lechada.

Los humos que salen del absorbedor, se envían al intercambiador de calor (GGH), después de atravesar un eliminador de gotas que retiene las gotas de agua que pueda arrastrar el humo. En el lado de recalentamiento del intercambiador (GGH), los humos de combustión se

recalientan desde los 47 °C aproximadamente a los que se encuentra en el absorbedor hasta 85 °C, como mínimo, y posteriormente se envían hacia la chimenea existente.

El aire necesario para la oxidación del sulfito de calcio (CaSO<sub>3</sub>) a sulfato de calcio (CaSO<sub>4</sub>, yeso), se inyecta dentro de la lechada del absorbedor mediante soplantes que aspiran de la atmósfera. Este aire se convierte en pequeñas burbujas gracias a la acción de unos agitadores dispuestos en el interior del tanque absorbedor. Estos agitadores distribuyen las burbujas de aire por toda la lechada, lo que permite que el proceso de la oxidación mejore sustancialmente.

El principio químico de absorción y oxidación del SO<sub>2</sub> es el siguiente:

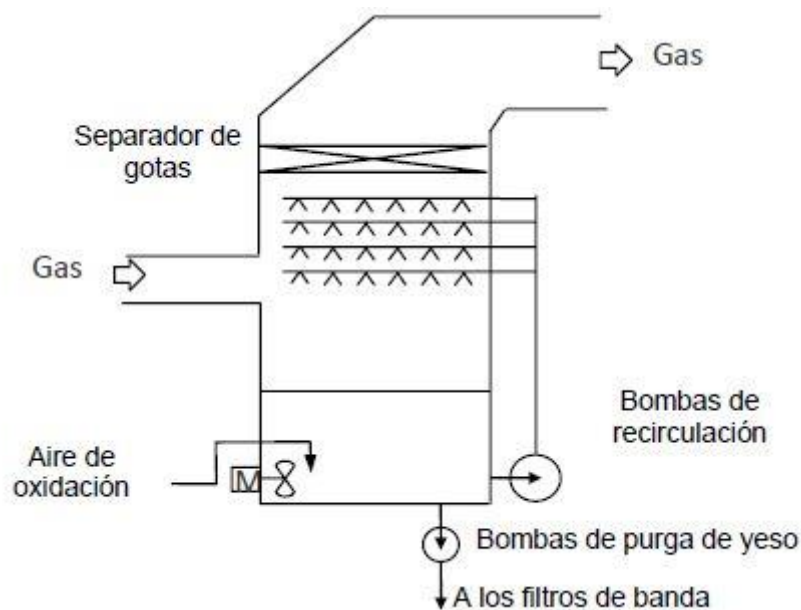
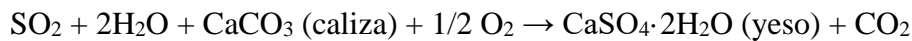


Imagen 3.1. Esquema del tanque absorbedor

Como material absorbente se emplea caliza, que llega a la central con un tamaño inferior a los 30 mm. La caliza se almacena en el silo y se transporta hasta el sistema de molinos de bolas mediante cintas. La lechada de caliza se obtiene en los molinos húmedos de bolas y se almacena en el tanque de lechada.

La lechada de yeso formada en el absorbedor se extrae directamente a un filtro de banda para eliminar su humedad. El agua de filtrado recuperada en el filtro de banda se almacena en el

tanque de agua de filtrado, para reutilizarla en el absorbedor. Parte del agua de filtrado se envía a la planta de tratamiento de aguas residuales, en la que se adapta la calidad de las aguas a la legislación vigente para este tipo de vertidos.

El yeso que se obtiene de los filtros banda se envía, normalmente, al silo de yeso, ya con un contenido de humedad inferior al 10% y una pureza superior al 90%.

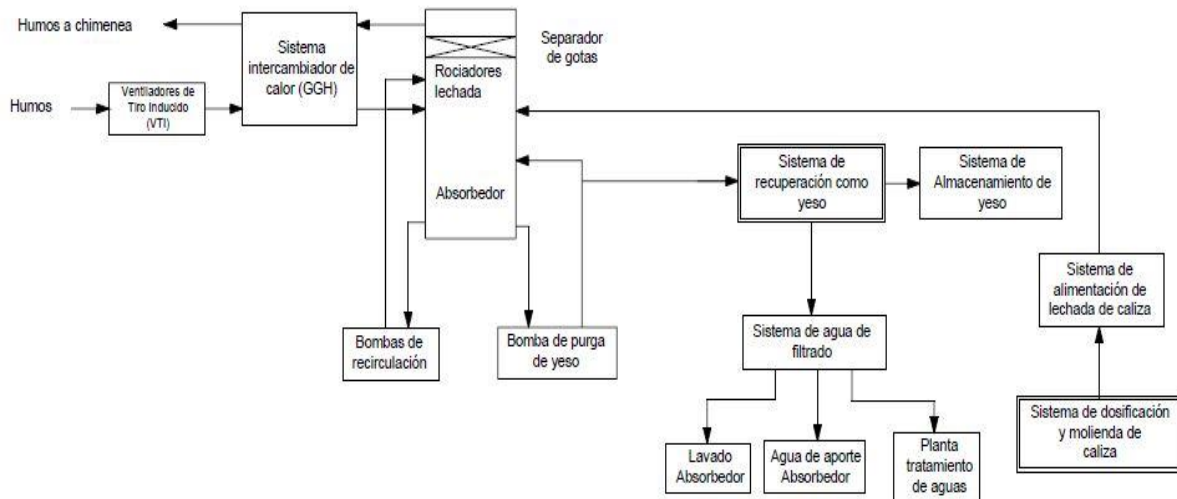


Imagen 3.2. Esquema general de la planta desulfuradora

### 3.2.- MAGNITUDES PRINCIPALES DEL PROCESO

La desulfuración requiere aportación continua de caliza, que se recibe a un tamaño adecuado (< 30 mm) en camiones, proveniente de las canteras existentes en Asturias. Esta caliza se pulveriza, mezclada con agua, en los molinos de caliza, obteniendo una lechada de color blanquecino que se inyecta en el tanque del absorbedor. A partir de aquí, y mezclado con la lechada del absorbedor, se rocía en contracorriente con los humos ascendentes en el absorbedor.

En este proceso la lechada disuelve el  $\text{SO}_2$  que contienen los humos e inmediatamente, en el tanque del absorbedor, se producen las reacciones químicas que dan lugar a la formación de yeso. Este yeso se extrae hasta los filtros de banda donde se seca y se envía a un silo desde donde se extrae por medio de camiones.

La planta de desulfuración introduce una pérdida de carga en el circuito de humos de unos 39 mbar (caso base a plena carga). Esta pérdida de carga se debe a una mayor longitud de recorrido de los humos y, principalmente, a la baja temperatura que alcanzan los humos después de su salida del absorbedor. La disminución de temperatura de los humos reduce el tiro de la chimenea y facilita la condensación de las sustancias corrosivas en el conducto de salida. Por todo ello ha sido necesario sobredimensionar los ventiladores de tiro inducido que extraen los humos de la caldera, aumentando sensiblemente el consumo de auxiliares del Grupo.

Para los cálculos de los valores de las variables de todos los equipos se emplean dos hipótesis, las cuales se definen como “Caso base” y “Peor caso”. La primera de ellas se refiere a la situación de operación habitual, una vez que la secuencia de arranque del Grupo ha finalizado, y está funcionando en régimen permanente. En esta situación la caldera consume 270.000 Nm<sup>3</sup>/h de GHA, lo cual produce un 30 % aproximadamente de la potencia total, como ya hemos mencionado previamente. Por otro lado, se entiende como “Peor caso” la situación en la que, de una forma sostenida en el tiempo, el Grupo está produciendo toda la potencia consumiendo sólo carbón en la caldera.

No obstante, para dimensionar el GGH y los equipos auxiliares que involucra se emplea sólo la hipótesis de “Caso base”, ya que es la más desfavorable desde el punto de vista de caída de presión en el circuito de humos del FGD.

Esto es debido a que el PCS del GHA es inferior que el del carbón, por lo que para obtener la misma potencia calorífica el volumen de humos producido es mayor al “sustituir” un 30 % de carbón por GHA en el Caso base.



Parámetros garantizados	Caso base
Pérdida de carga de la desulfuración (lado gas)	39 mbar
Pérdida de carga de la desulfuración en by-pass (lado gas)	5,5 mbar
Caudal volumétrico de gas	2.362.604 Nm <sup>3</sup> /h húmedo
Temperatura del gas a la entrada de la chimenea	≥ 85 °C
Producción de yeso (10 % humedad)	10 t/h
Capacidad de tratamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales	12,3 m <sup>3</sup> /h
Calizas asturianas (1,8 % Mg)	9.370 kg/24 horas
Disponibilidad	≥ 98 %

Tabla 3.1. Principales magnitudes del sistema

### 3.3.- PROCESOS Y SISTEMAS PRINCIPALES

A continuación se indica un listado de los principales procesos y sistemas que intervienen en la planta desulfuradora:

- Ventiladores de Tiro Inducido (VTI)
- Sistema de humos
- Intercambiador de calor (GGH)
- Sistema absorbedor
- Sistema de caliza
- Sistema de recuperación de yeso como subproducto
- Sistema de aguas
- Sistema de drenajes
- Planta de tratamiento de agua residual

- Sistema de aire comprimido
- Sistema de protección contra incendios
- Aire acondicionado
- Ascensores y medios de elevación
- Sistema de control distribuido (DCS)
- Sistema de circuito cerrado de televisión (CCTV)
- Sistemas eléctricos
- Sistema de telefonía y megafonía
- Sistema de red de datos

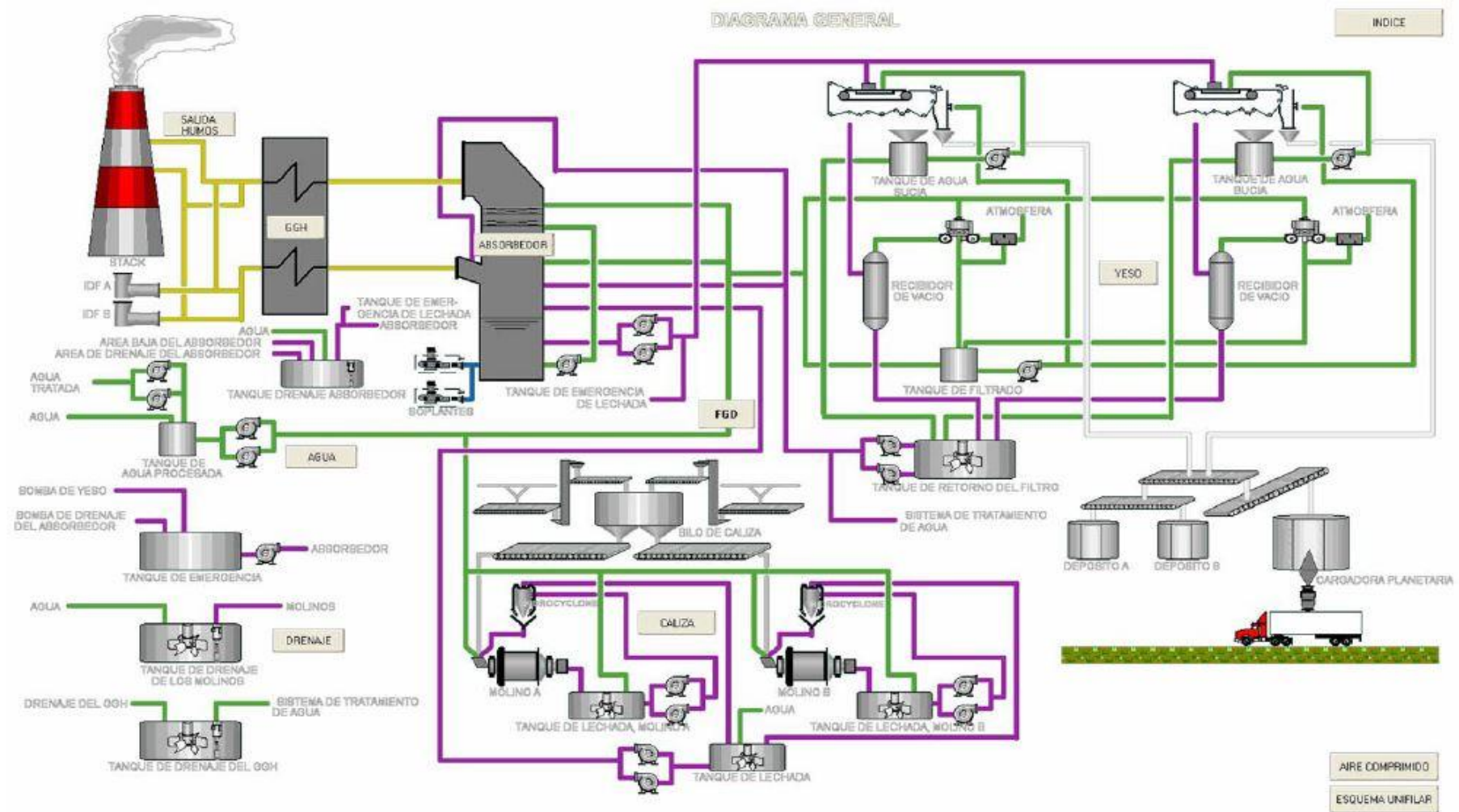


Imagen 3.3. Control de la planta desulfuradora desde el DCS

### 3.4.- EQUIPO GGH

El GGH es un intercambiador de calor del tipo Ljungstrom en el cual ambos fluidos de intercambio de calor son gas (*Gas-Gas-Heater*). Los calentadores Ljungstrom se caracterizan porque la parte activa (elementos o “cestas”) de intercambio de calor es giratoria. Se trata de intercambiadores de calor regenerativos, este término significa que la transmisión de calor se repite continuamente a medida que los elementos del intercambiador de calor giran, alternando su paso por las corrientes de humos entrantes y salientes.

Los elementos de transmisión de calor, que en este caso son cestas metálicas, están dispuestos en 16 módulos de sectores cilíndricos o compartimentos dentro del rotor, que es un cilindro con divisiones radiales. La envoltura que rodea al rotor tiene conexiones para conductos en ambos extremos. Una mitad del rotor queda en el conducto de humos sin tratar (los que se envían al absorbedor) y la otra mitad en el conducto de humos tratados (los que salen del absorbedor), formando dos pasajes de humos por cada mitad del intercambiador de calor.

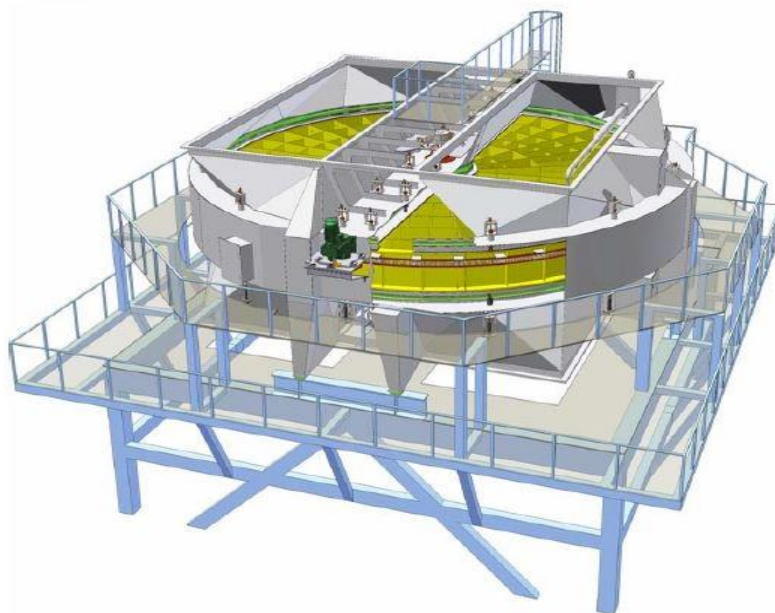


Imagen 3.4. Intercambiador de calor GGH

Según se produce el giro del rotor (su velocidad de giro es de una vuelta cada minuto), los elementos de transmisión de calor se interponen en la corriente de humos calientes, procedentes de la impulsión de los VTI, de los que toman parte de su calor. A continuación, el giro del rotor hace que estos elementos calientes se interpongan en la corriente de humos más fríos que salen del absorbedor. Los elementos de transmisión de calor ceden a los humos el calor acumulado, elevando la temperatura de los humos tratados de unos 47 °C a 96 °C aproximadamente. Este proceso continúa mientras el rotor gira y los elementos pasan alternadamente por las secciones de humo tratado y no tratado.

El lado Norte, y más cercano a los ventiladores de tiro inducido, constituye el paso de los humos hacia el absorbedor, mientras que la otra mitad, la del lado Sur, constituye el paso de los humos tratados. El flujo de los humos de entrada es ascendente y el de los humos de salida descendente; este hecho junto con el giro del rotor explica el gradiente térmico del calentador, la parte más caliente del rotor que es el extremo inferior por donde entran los humos sin tratar impulsados por los VTI se llama “extremo caliente”, mientras que el término “extremo frío” se refiere al extremo superior del rotor por donde salen los humos ya tratados hacia la chimenea. Este hecho tiene gran importancia ya que como consecuencia de esta diferencia de temperaturas entre la parte inferior y la superior se produce una curvatura de toda la estructura haciendo que en la zona perimetral del rotor, ésta pueda llegar a rozar con la parte superior de la estructura fija. Esta variación puede ser de hasta 15 mm.

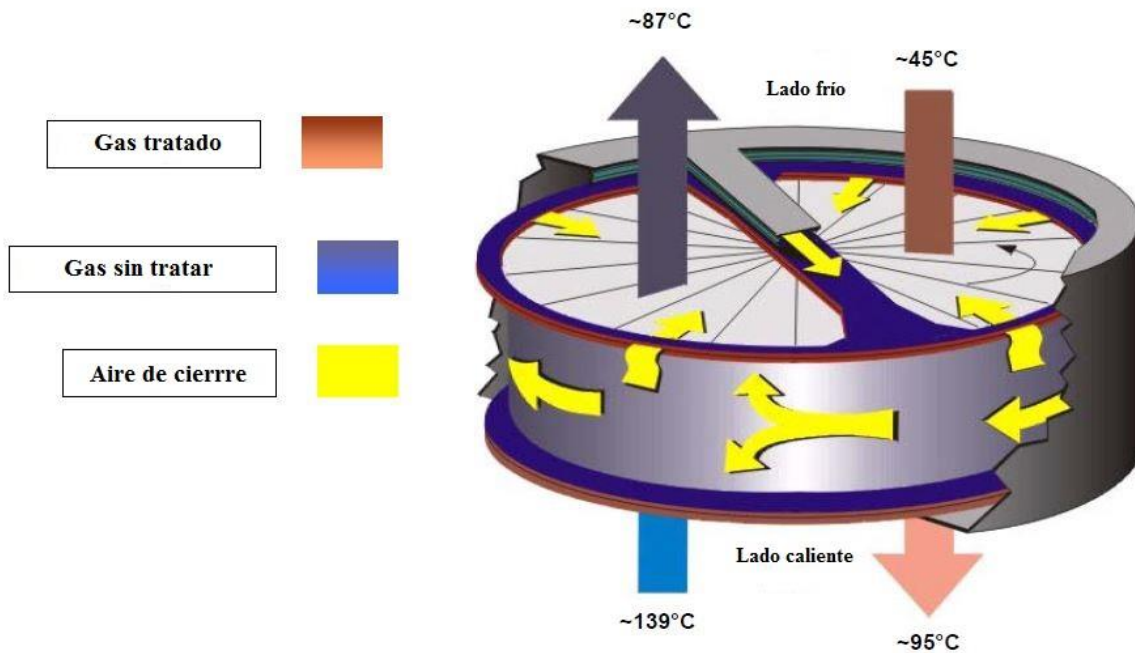


Imagen 3.5. Principio de funcionamiento del GGH

El rotor es una estructura de acero que consiste en paredes radiales y concéntricas que forman compartimentos en los que se localizan los elementos intercambiadores de calor. Las paredes radiales del rotor y los salientes en la parte superior e inferior de las paredes concéntricas, forman la parte de giro del sistema de sellado.



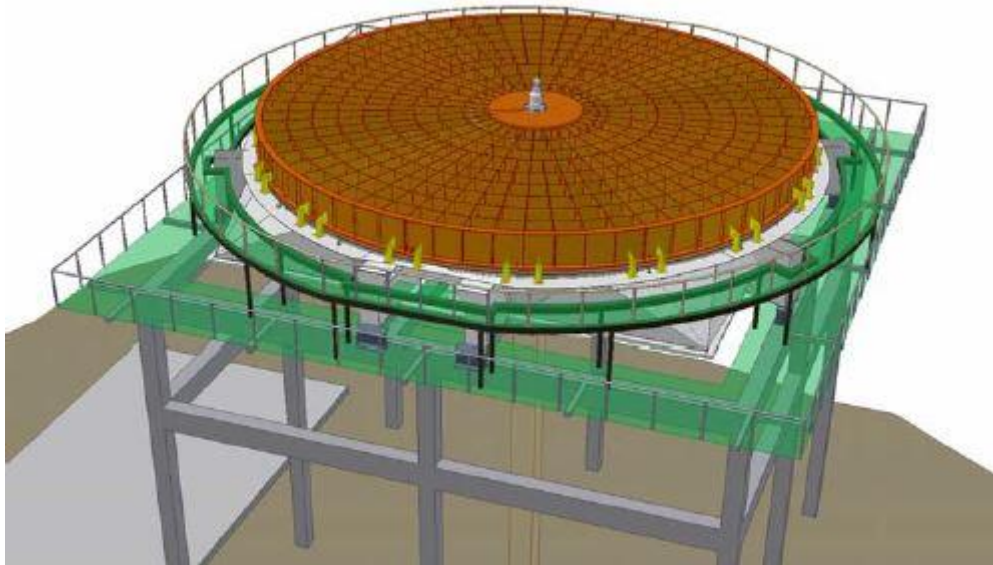


Imagen 3.6. Rotor y cestas del GGH

Como ya se ha mencionado antes, durante el funcionamiento del GGH, el rotor está sometido a un alto gradiente de temperaturas entre la zona caliente (inferior) y la fría (superior). Esta diferencia de temperaturas hace que se produzca una flexión del rotor hacia arriba. Para realizar un ajuste fino y que queden las menores holguras posibles entre la estructura del rotor y la envoltura del GGH es necesario realizar una modificación, que consiste en un muelle con un tornillo de ajuste y una zapata inferior.

Estos mecanismos se encuentran fijados a la envoltura del rotor y están dispuestos a lo largo de todo el perímetro exterior de la estructura. Previamente al arranque del GGH estos dispositivos son regulados por el operador de planta, de tal manera que se disminuya lo máximo posible el hueco existente entre la parte superior del rotor y la envoltura del GGH, sin llegar a tocar. Durante el funcionamiento este muelle regula automáticamente la posición de la zapata en función del grado de flexión del rotor, impidiendo que se produzcan altas fuerzas de rozamiento entre la parte fija del rotor y la móvil de la envoltura.

Asimismo, existen mecanismos de ajuste automático mediante un cilindro neumático. Este dispositivo se instala en la parte inferior de la envoltura del rotor, a lo largo de todo el perímetro, y en la zona intermedia del GGH, en la parte inferior de las placas de cierre radial. La presión del cilindro se encuentra fijada a un valor constante con el objetivo de que el



movimiento del pistón neumático siga la deformación del rotor, manteniendo un espacio mínimo entre la parte fija y la móvil del GGH, e impidiendo el paso de los humos al exterior.

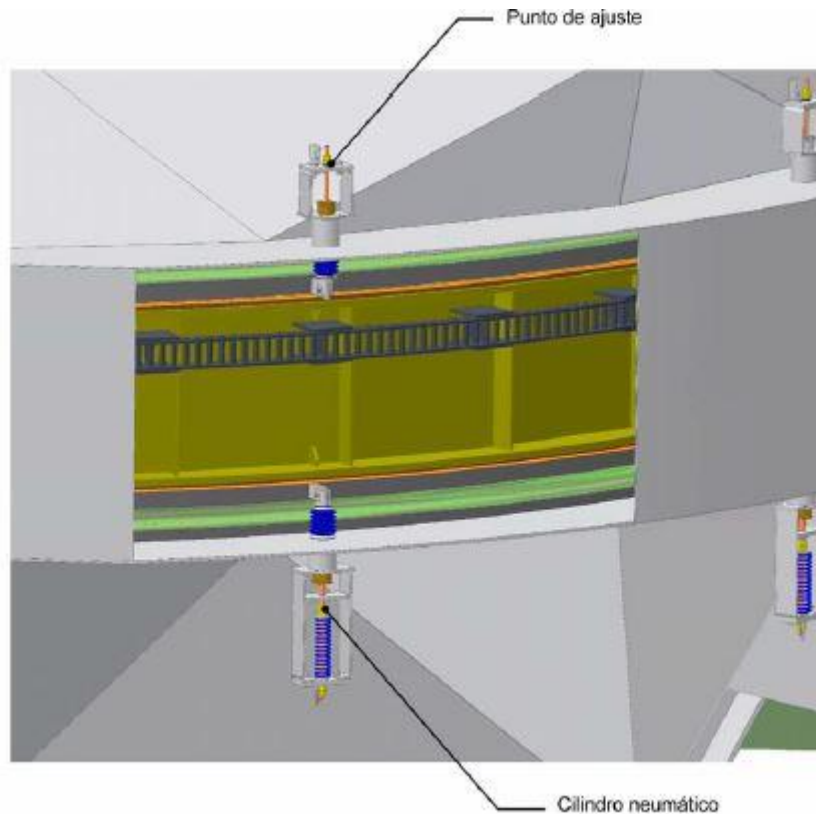


Imagen 3.7. Mecanismos de ajuste de sellado del rotor

Los elementos calefactores consisten en paquetes de chapas onduladas recubiertas de acero perfilado, formando conjuntos que se denominan "cestas", las cuales rellenan los 9 compartimentos en forma de sector cilíndrico en los que se divide el rotor del calentador. Los elementos de transmisión de calor o cestas consisten en parejas de láminas esmaltadas de acero, que son instaladas en bloques para permitir el manejo de los mismos. Cada elemento calefactor o cesta consiste en una pareja de chapas onduladas y arrugadas de forma coordinada. Se ensamblan de manera que alternativamente una chapa con surcos longitudinales se posiciona al lado de una hoja con surcos diagonales. Gracias a esta disposición de los perfiles ondulados y al gran número de chapas, se consigue una gran eficiencia de transmisión de calor con bajas pérdidas de presión, a la vez que se producen turbulencias en el flujo que favorecen el intercambio de calor.

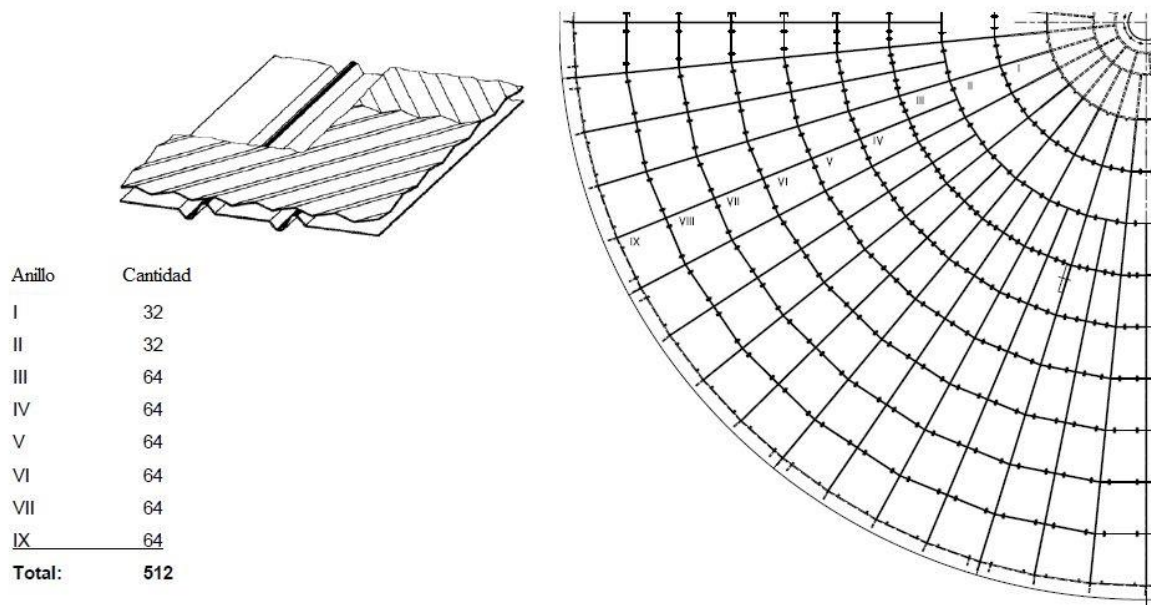


Imagen 3.8. Disposición de las cestas del GGH

Para separar las secciones de humo tratado y humo sin tratar, existen unas placas de cierre radiales, que constituyen la zapata central de sellado, en los extremos caliente y frío del rotor. Estas placas centrales van montadas a través del rotor, entre las conexiones de los conductos de humos tratados y sin tratar del GGH. Las zapatas centrales permanecen fijas mientras el rotor gira entre ellas. Además, existen placas de cierre axial alrededor de todo el perímetro del GGH. Estas placas se sitúan en los extremos frío y caliente para crear superficies de cierre alrededor de la cubierta del rotor en esos lugares. Sobre estas placas actúan los mecanismos de ajuste del sistema de sellado.

Con el objeto de impedir la fuga de los humos a la atmósfera, se introduce aire a una presión superior a la atmosférica. El sistema realiza una función de barrera impidiendo que los humos de sellado entren en las zonas en las que se introduce el aire de sellado. La posible entrada de humos a estas zonas causaría situaciones de peligro para los materiales que las componen. El aire de sellado se suministra de los ventiladores de aire de sellado y mediante un conducto procedente del sistema de aire comprimido de la planta desulfuradora. Este sistema se encarga, mediante dos ventiladores de aire de sellado, de introducir aire a una presión superior a la atmosférica:

- Alrededor del muñón, entre la envoltura del GGH y el cojinete superior
- Alrededor del muñón, entre la envoltura del GGH y el cojinete inferior
- La zona del piñón que engrana sobre la corona del rotor del GGH
- El sistema de suministro de soplado de hollín (sistema de limpieza), para hacer un barrido de la tubería cuando éste se encuentra fuera de servicio, además de refrigerar el brazo de limpieza del GGH

En la imagen mostrada a continuación se puede ver de forma más clara como se constituye la parte del rotor del GGH, junto con su estructura exterior.

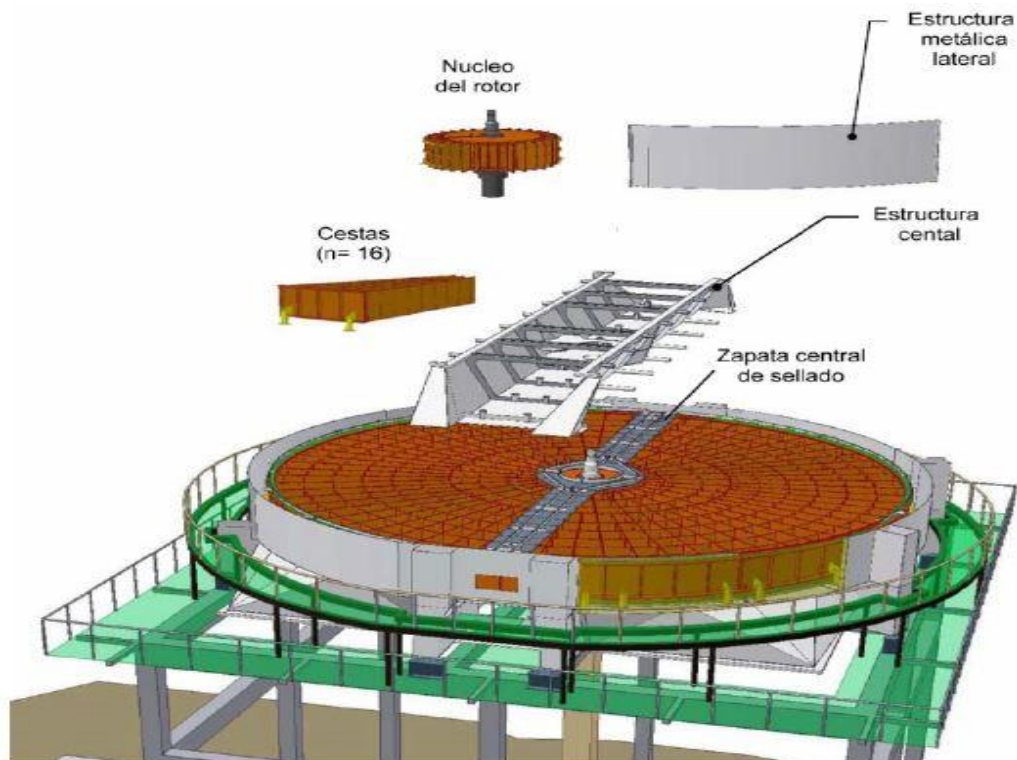


Imagen 3.9. Elementos de constitución del GGH

## 4. Brazo de limpieza

Para evitar el ensuciamiento o colapso de los elementos intercambiadores de calor durante la operación, lo cual incrementaría la caída de presión en el circuito de humos, el GGH está equipado con un sistema de limpieza. Este sistema evita la acumulación de ceniza en las cestas del GGH y consta de los siguientes componentes:

- Brazos de soplado de los humos sin tratar en el lado frío y en el lado caliente del GGH. Los brazos disponen en su de 8 boquillas de rociado, situados en el cabezal del brazo
- Motor para mover los brazos de soplado
- Bomba de agua de alta presión a 150 bar
- Sistema de tuberías/válvulas

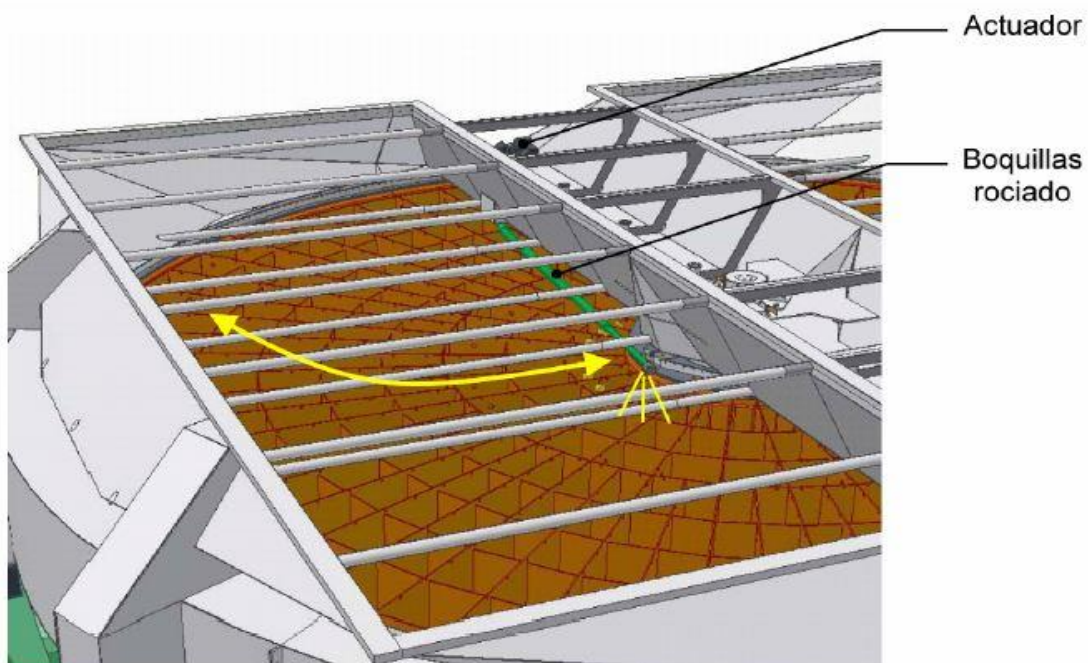


Imagen 4.1. Brazo de soplado del GGH

Para saber si el sistema está muy sucio, es decir, si se ha depositado mucha cantidad de cenizas en las cestas, se mide la diferencia de presión entre la parte superior e inferior de las

mismas (lado frío y lado caliente). Esta medida se transmite de forma inmediata a la sala de control, constando de un sistema de medida redundante por seguridad. Un valor normal de ésta diferencia de presión, que indicaría que las cestas están limpias, estaría en torno a 8 mbar. En la sala de control está programada una alarma a los 11 mbar para indicar que el GGH ha llegado a un valor alto de suciedad en cestas.

Actualmente existen tres métodos de limpieza del GGH: limpieza con agua a alta presión, limpieza con agua a baja presión y limpieza con aire comprimido. La limpieza con aire comprimido y con agua a baja presión comparten el mismo circuito de limpieza, mientras que la limpieza con agua a alta presión se suministra por una línea independiente.

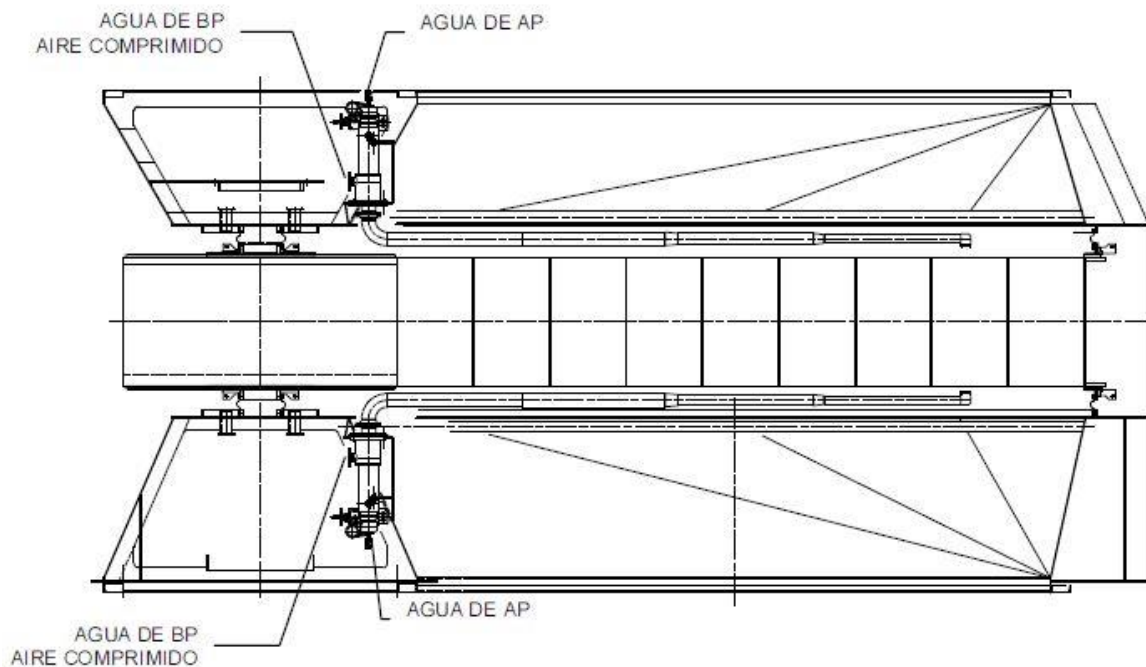


Imagen 4.2. Brazos de limpieza

Durante la limpieza del GGH cada brazo de soplado realiza un movimiento de rotación de unos 90 ° sobre el eje de giro. En su posición de reposo el brazo de limpieza se mantiene estático, encontrándose alojado a un lado de la estructura divisoria de los dos circuitos de humos del GGH, lado humos sin tratar. Cuando la limpieza se pone en marcha el sistema de control da una orden al motor de accionamiento, que se encuentra situado en la parte externa de la estructura divisoria de ambos circuitos de humos. La limpieza del GGH se realiza en ciclos de 176 minutos, en los cuales el brazo permanece estático durante un minuto para a



continuación rotar durante 1,8 segundos, volviendo a permanecer estático otro minuto, y así sucesivamente. Al mismo tiempo, y como se ha indicado previamente, el rotor de las cestas del GGH permanece girando a 1 vuelta por minuto.

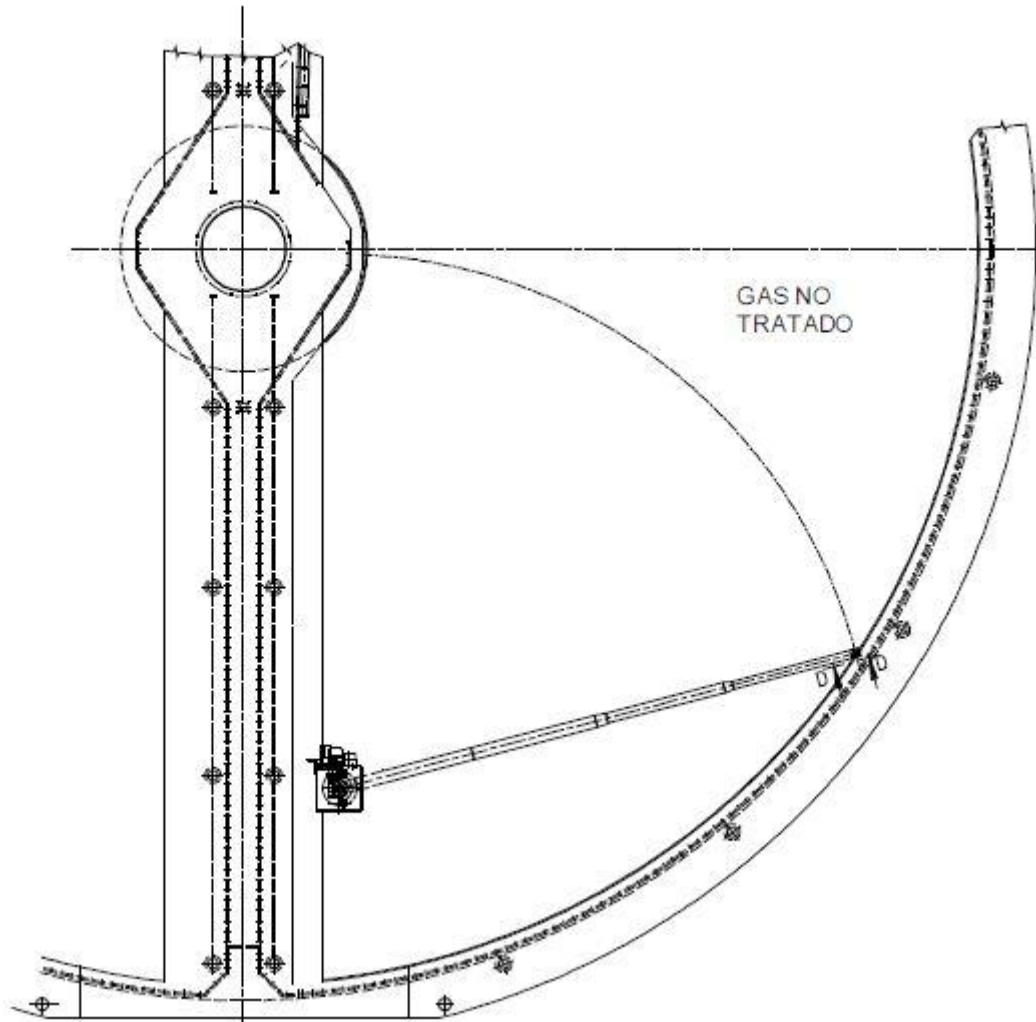


Imagen 4.3. Movimiento del brazo de limpieza

#### 4.1.- MODOS DE LIMPIEZA

- Limpieza con aire comprimido

El soplado del hollín con aire comprimido es el método en operación normal y se efectúa con el equipo y el Grupo en marcha. Este lavado tiene una duración de 3 horas, y se realiza automáticamente cada 8 horas. La limpieza se realiza con aire comprimido a 6 bar.

- Limpieza con agua a alta presión

El lavado con agua a presión será necesario si en el soplado periódico con aire comprimido se sigue detectando una diferencia de presión alta entre el lado frío y caliente del GGH.

Para la limpieza con agua a alta presión se dispone de una bomba de alta presión que se alimenta del sistema de agua de proceso. Esta bomba suministra agua a una presión de 150 bar que se inyecta sobre las superficies intercambiadoras de calor a través de las ocho boquillas del brazo de limpieza.

Este sistema de limpieza se lanza de forma manual por el operador de cuadro en sala de control cuando se activa la alarma a 11 mbar por alta dP en las cestas.

- Limpieza con agua a baja presión

Para esta limpieza se utiliza agua de proceso a 6 bar. El conducto de agua de proceso para la limpieza se toma del conducto de aspiración de la bomba de alta presión (HP), antes de la válvula manual de aislamiento.

No es posible una limpieza conjunta del GGH con agua y aire comprimido. Para realizar la limpieza con agua es necesario cerrar la válvula manual *shut-off* de la línea de aire comprimido e intercambiar manualmente los conductos mediante las uniones roscadas correspondientes. Esto se puede observar mejor en el plano del Anexo 2.

Este sistema de limpieza solo se realiza cuando el GGH se encuentra parado, *OFF-line*, y sirve para remover los depósitos de ácido que puedan quedar almacenados en los elementos calefactores. Al final del proceso el GGH debe de ser secado con el fin de prevenir una corrosión severa de los materiales que lo constituyen.

## 4.2.- PROBLEMÁTICA

Dado que el Grupo II se encuentra la mayor parte del tiempo en funcionamiento a plena carga, continuamente se están produciendo una gran cantidad de humos que deben ser tratados, por lo que la planta desulfuradora en general y el GGH en particular es un equipo que está en operación permanentemente. Esto implica que los brazos de limpieza también han de funcionar correctamente de forma continua y fiable durante muchas horas al año.



Si se incrementa la acumulación de cenizas en las cestas del GGH, se produce una alta caída de presión al paso de los humos a su través antes de salir por chimenea. Esto aumenta el consumo de auxiliares (mayor potencia de los VTIs) y puede poner en riesgo el funcionamiento del Grupo (si la caída de presión en el GGH es muy elevada podrían llegar a actuar las protecciones por sobrepresión en la unidad y disparar el Grupo). Si la limpieza con aire no es efectiva, se debe realizar la limpieza con agua a alta presión más veces de las que estaba previsto a la hora de diseñar el sistema. Esto presenta varios inconvenientes:

- El desgaste del esmalte de las cestas. Este recubrimiento sirve para evitar que el paso de los humos acabe deteriorándolas por corrosión, por lo que disminuir dicha capa provoca que la vida útil de las cestas sea menor, así como su rendimiento.
- Lavar las cestas con agua (ya sea a presión o no) aumenta la humedad en la salida de los humos a la chimenea, lo cual dificulta el tiro.
- Un uso excesivo de la limpieza a alta presión provoca un sobreesfuerzo de la tubería que transporta el agua en el brazo de limpieza, ya que está sometido a una presión muy alta. Esto implica que aparezcan pequeños orificios o grietas en el tubo, haciendo que la velocidad de salida por la tobera se reduzca enormemente. Con un valor de presión del agua bajo no se elimina correctamente la suciedad, ya que esta se acumula y solidifica produciendo una pasta similar al cemento, el cual dificulta enormemente el paso de los humos.

Además de los problemas derivados del uso excesivo de agua para la limpieza, ocasionalmente es necesario realizar operaciones de mantenimiento en el propio brazo de limpieza, ya sean preventivos o correctivos para solucionar algún problema que pueda ocurrir.

Las alternativas para paliar lo anterior consisten básicamente en disminuir la cantidad de humos provenientes de la caldera, para así reducir la caída de presión a su paso a través de las cestas y poder realizar la limpieza con agua a presión de forma más efectiva. Para ello se puede optar por dos alternativas: Bajar la carga, es decir, reducir el consumo de combustibles para así generar menor potencia, o suprimir completamente la combustión de gas de horno alto (GHA), que dado su bajo poder calorífico requiere de un gran caudal para producir la

misma potencia térmica que otros combustibles, generando por tanto mayor cantidad de humos. Ambas alternativas suponen grandes costes para la empresa.

En caso de que se produzca una avería en el brazo de limpieza, como éste se encuentra dentro del equipo, para trabajar sobre él es necesario que no esté circulando humo a través del GGH, por lo que sería necesario parar el Grupo.

Para contextualizar la problemática sufrida en el equipo desde su instalación, en la tabla expuesta a continuación se muestra el historial de Órdenes de Trabajo (OT) generadas en el GHH, así como el recuento de lavados con agua a alta presión realizados en las cestas desde 2008 hasta 2016.

Órdenes de Trabajo	2008 (PEM)	2009	2010 (RFC)	2011	2012 (RFC)	2013	2014	2015	2016 (RFC)
OTs Mto ECI	11	16	9	9	14	5	15	39	31
OTs Mto MCO	12	18	23	6	12	10	9	45	30
Lavado <i>ON-line</i> (150 bar) en MNT	0	0	0	3	2	4	7	34	2
Lavado <i>OFF-line</i> (300 bar)			1		1				1

Tabla 4.1. Historial de OTs y lavados 2008-2016

En la tabla anterior se diferencian las OTs según sean producidas por la realización de un mantenimiento electrónico y de instrumentación (ECI) o mantenimiento mecánico (MCO). En general el mantenimiento ECI suele ser más sencillo que el MCO, ya que la mayor parte de la electrónica e instrumentación del equipo se encuentra en el exterior del GGH, por lo que el acceso es más fácil para los operarios. Además, casi todos los fallos de este tipo están relacionados con el ensuciamiento producido por el ambiente en el que se encuentran situados, lo cual no suele implicar fallos críticos.

En cambio, el mantenimiento MCO suele estar relacionado con las partes móviles del GGH (rotor, cestas y brazo de soplado principalmente), siendo lo más habitual fugas de gas o

roturas de algún componente por fricción. Es por ello que las operaciones de mantenimiento suelen ser más complejas y costosas.

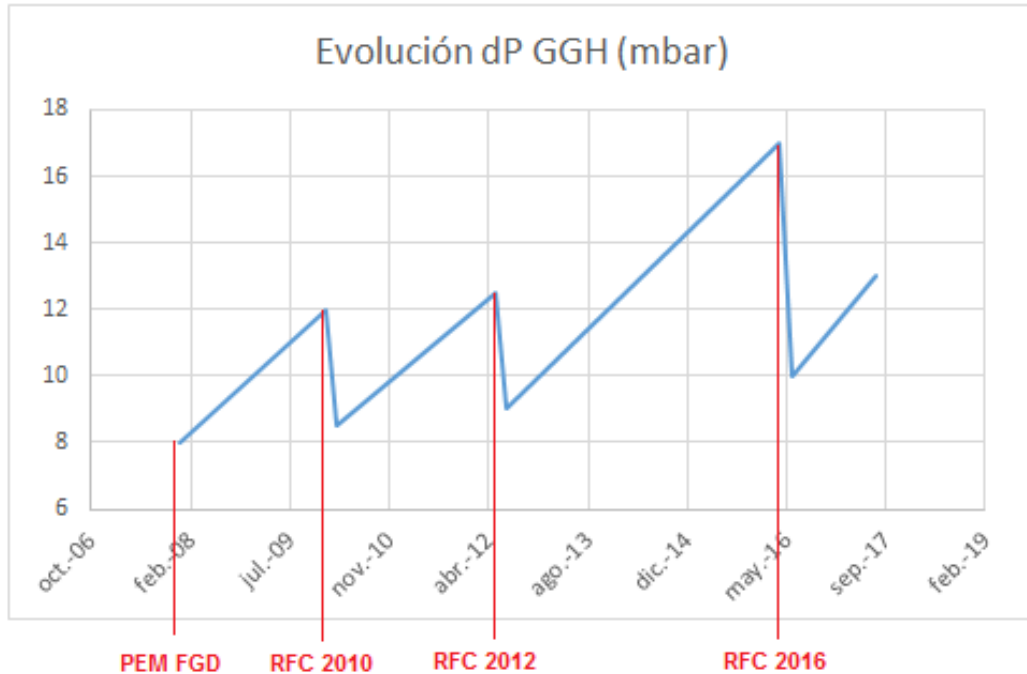


Imagen 4.4. Evolución de la dP en las cestas del GGH

En la imagen anterior se puede observar la evolución de la dP, que como se ha mencionado previamente indica el nivel de suciedad de las cestas, desde la puesta en marcha (PEM) de la desulfuradora a finales de 2007 hasta septiembre de 2017.

En dicha gráfica se aprecia como el ensuciamiento en las cestas sigue una evolución lineal, puesto que la pendiente es siempre similar. Del mismo modo, se puede ver como los puntos en los que la dP cae rápidamente hasta un mínimo local corresponde con las Revisiones Fin de Campaña (RFC), en donde el Grupo para temporalmente su actividad y se realiza un lavado *OFF-line* con agua a 300 bar. Observando detenidamente la gráfica, se puede ver como en la RFC de 2010, una vez realizado el lavado *OFF-line*, la dP recupera un valor cercano a 8 mbar, aunque ligeramente superior. Esto es debido a que el lavado no consigue eliminar totalmente la suciedad adherida a las cestas, y además daña el esmalte de las mismas lo cual reduce su eficacia. Si nos fijamos en los lavados de las demás RFC vemos que esto ocurre de la misma forma, unido al deterioro de las cestas por su uso habitual. Esto provoca

que la dP mínima vaya aumentando progresivamente a lo largo del tiempo, provocando los problemas potenciales que ya hemos mencionado con anterioridad.

Además de esto, hay que añadir que entre 2008 y 2012 tuvieron lugar dos RFC, en donde el Grupo se paró y se pudo realizar una limpieza *OFF-line* que es mucho más efectiva, lo cual corresponde a las especificaciones impuestas por el fabricante. No obstante, entre 2012 y 2016 sólo tuvo lugar una RFC, lo cual explica que a partir de 2014 el ensuciamiento en las cestas fue muy alto (valores por encima de 11 mbar) que provocaron que la limpieza normal realizada por aire no fuera eficaz, haciendo necesario aumentar en gran número la cantidad de lavados *ON-line* con agua a presión a 150 bar, que como ya se ha descrito anteriormente, no está diseñado para realizarse de forma tan habitual.

## 5. Análisis de soluciones

En vista de los problemas ocasionados por el actual brazo de soplado, desde la dirección de la empresa se propone el estudio de alternativas para su sustitución por otra tecnología que pueda realizar la misma operación de limpieza de una manera más eficiente. Se considera que la inversión está suficientemente justificada, ya que como se ha mencionado anteriormente un problema de acumulación excesiva de ceniza en las cestas del GGH puede suponer la parada del Grupo, lo cual implica una gran pérdida de beneficios.

Para ello, las alternativas a estudiar consisten en la sustitución de los actuales brazos de soplado por otros, que sean diferentes por su geometría, forma en la que se desplazan o tecnología de limpieza que utilizan.

El estudio de las posibles alternativas se centrará en equipos o instalaciones existentes en el mercado, es decir, en el presente TFM se compararán soluciones reales, que deberán ser adaptadas a las condiciones de funcionamiento del GGH del Grupo II de la central térmica de Aboño, pero en ningún caso se tratará de desarrollar un equipamiento específico para el mismo.

### 5.1.- BRAZO DE LIMPIEZA RETRÁCTIL

Este tipo de brazos de limpieza son los más habituales en la industria, tanto para intercambiadores de calor de gas como para calderas. Su principal característica es que se sitúan fuera del equipo sobre el que actúan, y únicamente se introduce durante la operación de limpieza. De esta forma, el resto del tiempo el brazo permanece disponible para realizar cualquier tipo de mantenimiento sobre él, y no está en contacto permanente con los humos.

El principio de operación resulta ser similar al brazo actualmente instalado. El brazo retráctil cuenta con un cabezal con 8 boquillas en su extremo, por el que saldrían aire o agua a presión, según el tipo de limpieza que se desee realizar. De esta forma, durante el tiempo que dura la limpieza, el brazo estaría programado para realizar un movimiento lineal a lo largo del radio del GGH.

El movimiento de retracción se realiza mediante un actuador neumático, que es controlado desde la sala de control. Mientras el brazo se encuentre *OFF-line*, permanece en reposo dentro de una cubierta metálica para protegerlo de la corrosión del ambiente exterior y evitar su ensuciamiento. Dicha cubierta además hace de guía a la hora de realizar el desplazamiento del brazo.

Como se ha mencionado, este tipo de brazos retráctiles son muy habituales en la industria, por lo que existen una gran variedad de fabricantes y distribuidores, así como muchas configuraciones para alcanzar distintos rangos de presión, longitud, etc. Además, en comparación con otras soluciones, estos brazos son mucho más económicos.

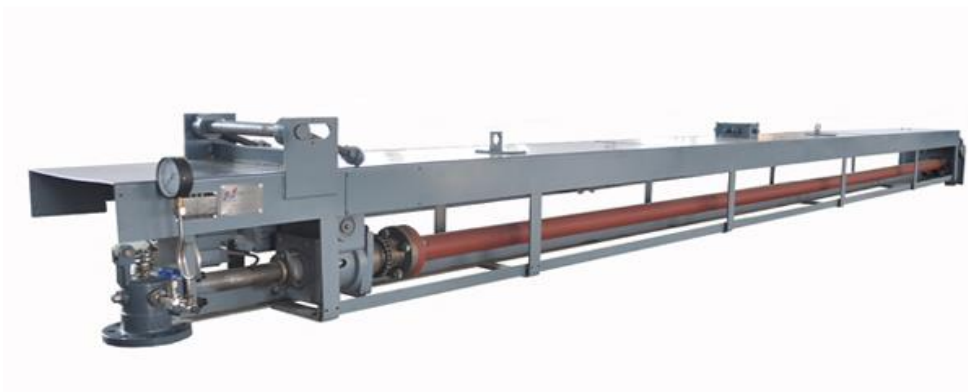


Imagen 5.1. Ejemplo de brazo de limpieza retráctil

La principal desventaja que presentan es que el diámetro del GGH es de 16 metros aproximadamente, por lo que es necesario un brazo de limpieza de 8 metros que ha de ser situado en el exterior. Por la situación en la que se encuentra el GGH dentro de la central térmica, esto supondría tener que instalar una nueva estructura que lo soporte, lo cual implica una mayor inversión económica.

## 5.2.- BRAZO DE LIMPIEZA TELESCÓPICO

Un brazo de limpieza telescópico opera de forma similar a uno retráctil, aunque presenta diferencias importantes en cuanto a diseño. Su característica principal es que está compuesto por una serie de tramos de tubería concéntricos, que son movidos por un actuador neumático al realizar la operación de extensión y encogimiento. Dichos tramos de tubería forman parte de la carcasa exterior, el fluido de limpieza (agua a alta presión) circula por el interior a través de un tubo flexible, que será de trenzado metálico o de plástico en función de la presión de operación deseada.

En la parte delantera del brazo estarán 8 boquillas por las que sale el agua a alta velocidad, realizando la limpieza de las cestas con un movimiento lineal a lo largo del radio del GGH, de la misma forma que opera el brazo retráctil descrito anteriormente.

Un brazo de limpieza telescópico presenta la ventaja de que ocupa mucho menos espacio, estando completamente en el exterior del GGH cuando está *OFF-line*, lo cual implica que es posible realizar cualquier labor de mantenimiento sobre él pudiendo seguir con el equipo en marcha. Del mismo modo, y por el poco espacio que sería necesario para situar el brazo de limpieza, no resulta necesario la instalación de una nueva estructura para soportarlo.

Sin embargo, el principal inconveniente que tienen este tipo de brazos es que no permiten la limpieza con agua a una presión tan elevada como otros, pudiendo obtener como mucho valores en torno a 100 bar en las boquillas. Hay que tener en cuenta que el brazo actual alcanza los 150 bar de presión, y lo deseable en el nuevo brazo sería obtener presiones aún mayores (en torno al doble: 300 bar).

Además de eso, estos brazos de limpieza son muy poco habituales en la industria, por lo que es una tecnología poco desarrollada y hay pocos fabricantes y distribuidores. Esto implica un mayor coste de adquisición, y potenciales problemas de mantenimiento en el futuro, tanto por falta de proveedores de recambios como de *know-how*.

## 5.3.- BRAZO DE LIMPIEZA DE RASTRILLO

Al igual que el primer tipo de brazo expuesto, éste también cuenta con una parte retráctil, aunque el cabezal del brazo es muy diferente. En este caso el brazo cuenta con tramos de



tubería dispuestos de forma perpendicular en donde van ubicadas las boquillas, de forma que se aumenta considerablemente el área de soplado. A pesar de que no son tan habituales en la industria como otros tipos de brazos de limpieza, existen varias configuraciones posibles de manera que puede haber 2 o 3 hileras de tuberías con boquillas de longitudes variables.

La parte delantera del brazo, en donde se encuentran las hileras de tubos con boquillas y se produce el soplado, no es retráctil, por lo que ésta permanece dentro del GGH aunque en ese momento no esté en servicio.



Imagen 5.2. Ejemplo brazo de limpieza con cabezal en forma de rastrillo

Durante el tiempo de operación, el brazo se mueve longitudinalmente por el radio del GGH, de forma similar a los brazos descritos anteriormente. En este caso, y dado que el área de soplado es mayor, la parte retráctil es de una longitud menor (de unos 5 metros aproximadamente), pero aun así sería necesario construir una estructura para sujetar el brazo ya que el espacio disponible fuera del GGH seguiría siendo insuficiente.

Otro inconveniente es que debido al mayor número de boquillas de soplado y su geometría la presión de la limpieza con agua es mucho menor que en el caso de un brazo retráctil, y para obtener una velocidad de salida del agua en dichas boquillas sería necesario redimensionar las actuales bombas y tuberías del circuito, lo cual implica un gran desembolso de dinero.

#### **5.4.- SISTEMA DE LIMPIEZA ACÚSTICO**

Esta solución es diferente a las demás alternativas en cuanto a la tecnología empleada. En este caso la limpieza no se realiza con un fluido (aire o agua a alta presión), si no que se emplean bocinas que emiten ruido a alta frecuencia.

Cuando se desea llevar a cabo la limpieza y se activan las bocinas, éstas producen una onda que impacta con las partículas de ceniza adheridas a las cestas del GGH, haciendo que estas vibren y se desplacen, de forma que por gravedad caigan a la parte de abajo en donde pueden ser acumuladas y posteriormente tratadas. Esta tecnología se emplea en otros equipos en la propia central térmica, obteniéndose buenos resultados.

No obstante, para que este sistema sea eficaz es necesario que las partículas a limpiar estén completamente secas, y que la bocina esté correctamente orientada hacia la superficie que se desea limpiar. Esta última condición parece fácil de cumplir a priori: basta con hacer que la forma de la campana que se encontraría dentro del GGH tuviese la curvatura adecuada, pudiendo estar el mecanismo neumático encargado de producir el sonido en el exterior. Para ello, sería necesario colocar un filtro o membrana que evitase la entrada de humos a dicho mecanismo.



Imagen 5.3. Ejemplo de sistema de limpieza acústico

Esto último tiene la ventaja de que, al igual que con los brazos de limpieza retráctil y telescópico, sea posible realizar un mantenimiento del sistema de limpieza con el equipo funcionando normalmente, ya que lo único que estaría dentro del GGH sería la campana metálica, que sería fácil de retirar del interior en caso de avería.

El principal inconveniente de este sistema es que los humos a tratar provienen del absorbedor, en donde se han puesto en contacto con lechada de caliza, tal y como se ha explicado anteriormente. Esto provoca que dichos humos tengan un porcentaje de humedad alto, por lo que se adhieren con más facilidad a las cestas formando una especie de pasta y reduciendo drásticamente la eficiencia de este sistema de limpieza. Para solucionar esto y poder emplear un sistema de limpieza acústico sería necesario deshidratar los humos antes de su entrada al GGH, ya que modificar el GGH para poder realizar esto dentro de él no parece viable técnicamente.

Por todo ello, para que este sistema pudiese funcionar en las condiciones adecuadas, sería necesario tratar los humos a la entrada del GGH, modificando los conductos e instalando un sistema de deshumidificación. Sin entrar en detalles, viendo el caudal de humos a tratar, y dado que no se conocen precedentes que demuestren la eficacia de una instalación como ésta, no parece que sea viable tanto técnica como económicamente.

## 6. Desarrollo de la solución

Una vez analizadas las posibles alternativas, la solución a adoptar será la de sustituir el brazo de limpieza superior (lado frío) por un brazo de limpieza retráctil, que se situará en el exterior del GGH, siendo necesario para ello la incorporación de una estructura que lo soporte.

### 6.1.- DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN

El propósito de instalar un nuevo brazo de limpieza es que se pueda realizar un ciclo de lavado en el intercambiador de calor Ljunstrom mediante el soplado de ceniza que queda adherida a los elementos calefactores, y que obstruyen el paso de humos. El objetivo es que esta limpieza sea realizada de forma eficaz con el soplado de aire, mientras que la limpieza con agua a alta presión sea realizada cada cierto tiempo o en situaciones puntuales en donde el ensuciamiento de las cestas sea mayor.

Para ello, se dejará en funcionamiento el brazo de limpieza del lado caliente, anulando la posibilidad de lavado con agua, haciendo que únicamente opere durante el lavado con aire.

El soplador multifunción escogido es el modelo Enerjet de la marca Howden. Dicha compañía es conocida por la empresa EDP, ya que ha realizado trabajos para ella previamente, estando involucrada en el proyecto de la desulfuradora y obteniendo resultados satisfactorios. A la hora de solicitar ofertas para este proyecto, además de otros criterios y detalles que por confidencialidad no se mostrarán en el presente TFM, el know-how de Howden en este tipo de equipos y su experiencia previa en proyectos para grandes instalaciones de potencia han hecho decantarse a la dirección de la empresa por su oferta en detrimento de otras.

El nuevo brazo de limpieza retráctil (lado frío) si será multifunción, pudiendo realizar el lavado con aire y con agua a 300 bar de presión como máximo. Para ello, será necesario modificar el circuito de agua y aire, redimensionando la bomba y la tubería.

Los componentes principales del soplador son: lanza retráctil, tubería de alimentación de agua, conjunto motor-reductor, válvula anti-vacío, cuerpo metálico y pared de sellado. En el documento “Anexo 1: Soplador Enerjet Howden” se muestra el plano de detalle del soplador

Enerjet de Howden, en el cual aparecen los componentes de los que está formado, además de los elementos electrónicos propuestos por el fabricante para su control. También se muestran tablas con las características básicas de su funcionamiento, como caudales y presiones.

La lanza del soplador cuenta con una tubería concéntrica al cuerpo del soplador por el que fluye el agua a presión. Tanto la tubería de agua como el cuerpo del soplador cuentan con toberas. No obstante, la tubería interior cuenta con 6 válvulas a la entrada de las toberas que sólo se abren para permitir que circule el agua a alta presión. Dichas válvulas son perpendiculares a las toberas exteriores, las cuales no tienen cierre, por lo que permiten el paso del chorro de agua a través de ellas. En la imagen a continuación se muestra una representación del funcionamiento de la lanza.

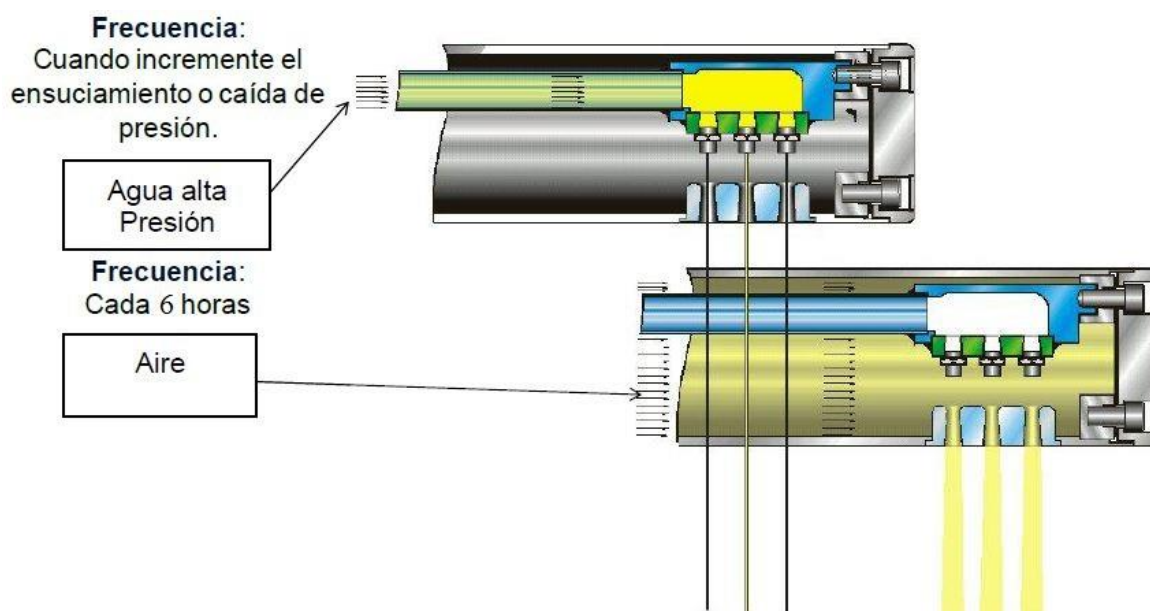


Imagen 6.1. Funcionamiento de la lanza del soplador Enerjet

## 6.2.- MODOS DE LIMPIEZA

Al igual que en la disposición anterior, con la instalación del nuevo soplador en el lado frío se desea mantener la posibilidad de realizar limpieza tanto con aire como con agua a alta presión. No obstante, gracias a la experiencia acumulada por el uso del sistema anterior se ha detectado que el nivel de ensuciamiento en las cestas exteriores es mucho mayor que en las cestas correspondientes a un radio pequeño del GGH.

Esto es debido a que la velocidad de giro del GGH es constante (velocidad angular de 1 rpm), lo cual quiere decir que la velocidad lineal en los puntos exteriores del radio es mayor que en los interiores. Si se considera que se produce una mayor limpieza cuando la misma superficie recibe un mayor caudal de agua o aire se explica que las zonas interiores estén más limpias, ya que al girar a una velocidad menor el tiempo que permanecen sometidas a la limpieza es mayor, recibiendo más caudal y por lo tanto más limpias.

El funcionamiento actual de los modos de limpieza es cíclico, una vez que comienza la secuencia de limpieza la boquilla del GGH se sitúa en el punto más interior durante el tiempo programado mientras se produce la limpieza. A continuación el brazo de soplado avanza durante 1,8 segundos a la siguiente posición para volver a limpiar durante el mismo tiempo. Esto se realiza de esta forma hasta que el brazo llega al final de carrera, momento en el que finaliza la limpieza. De este forma, todos los puntos de las cestas se limpian durante el mismo tiempo, pero al ser un movimiento circular esto no supone que la limpieza sea igual en todos los puntos.

Aprovechando la instalación del nuevo brazo de soplado, se va a estudiar cómo mejorar la lógica actual para tener en cuenta la situación descrita. Para ello, se supone que las boquillas del soplador actual cubren una superficie rectangular de X por Y. Además se considera que en cada ciclo el soplador avanza una distancia X, coincidiendo con el ancho cubierto por las boquillas.

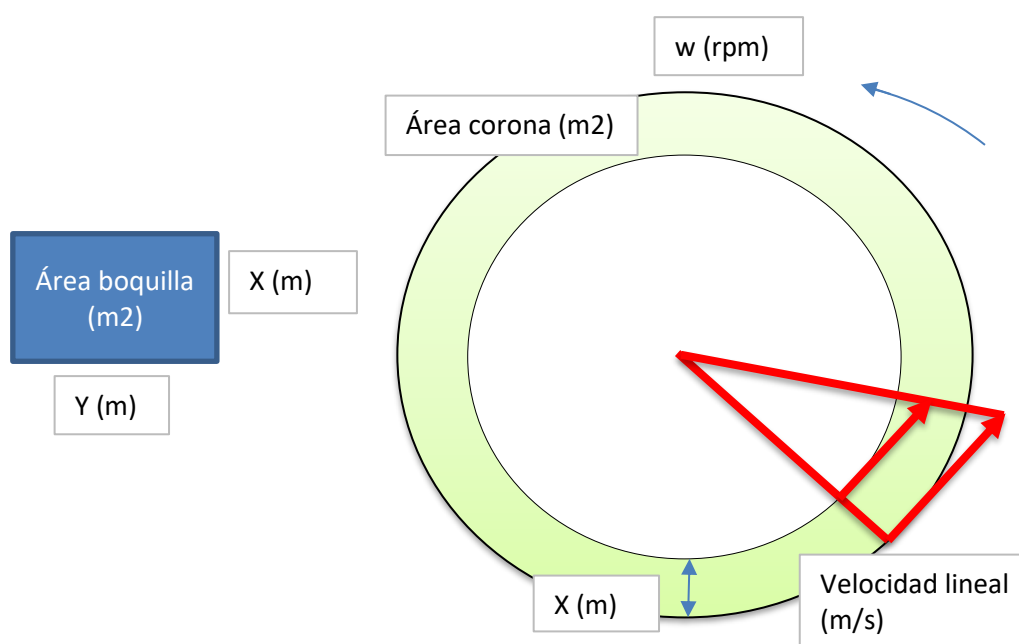


Imagen 6.2. Variables para cálculo de tiempos GGH

De esta forma es posible calcular el área de la corona circular que cubre el soplador en cada vuelta, llamando R al radio exterior y R-X el radio interior.

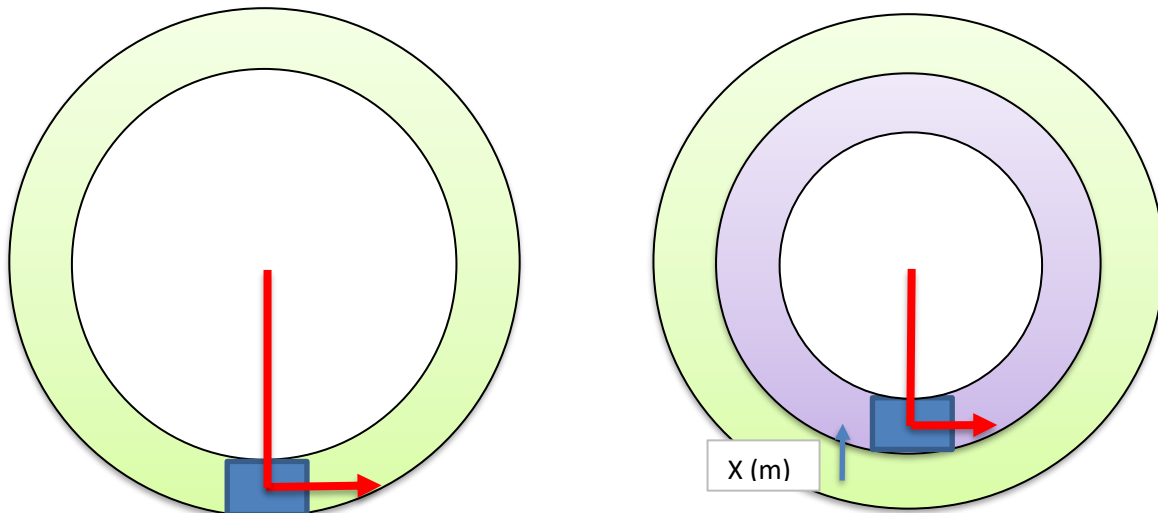


Imagen 6.3. Avance boquilla soplador

Se llamará  $A^i$  al área de la corona circular para cada posición de la boquilla, y  $T_i$  al tiempo que emplea la boquilla en realizar el lavado en dicha área. Teniendo en cuenta los supuestos anteriores, se considera que para que todas las cestas estén igual de limpias el tiempo de lavado por unidad de superficie debe ser constante, es decir:

$$\frac{T_1}{A_1} = \frac{T_2}{A_2} = \frac{T_3}{A_3} = \dots = \frac{T_n}{A_n}$$

Llamando  $T_n$  al tiempo que tarda la boquilla en lavar la posición más desfavorable, es decir, la más exterior, se puede obtener la relación de tiempos que tarda en lavar las sucesivas coronas circulares según va avanzando la boquilla.

$$T_{n-1} = T_n * \frac{A_{n-1}}{A_n}$$

Todos estos cálculos se pueden observar en la tabla a continuación, así como en la gráfica que muestra cómo varía el tiempo que tardan las boquillas del soplador en limpiar el GGH en función de la posición en la que se encuentren. Para ello, teniendo en cuenta la experiencia anterior se considera que un tiempo  $T_n = 4$  minutos es suficiente para limpiar la posición más desfavorable.

Radio (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Tiempo (min)	T Final (min)
8		4,0000	4
7,92	4,0011	3,9598	4
7,84	3,9609	3,9196	4
7,76	3,9207	3,8794	4
7,68	3,8805	3,8392	4
7,60	3,8403	3,7990	4
7,52	3,8001	3,7588	4
7,44	3,7599	3,7186	4
7,36	3,7196	3,6784	4
7,28	3,6794	3,6382	4
7,20	3,6392	3,5980	4
7,12	3,5990	3,5578	4
7,04	3,5588	3,5176	4
6,96	3,5186	3,4774	4
6,88	3,4784	3,4372	4
6,80	3,4382	3,3970	4
6,72	3,3979	3,3568	4
6,64	3,3577	3,3166	4
6,56	3,3175	3,2764	4
6,48	3,2773	3,2362	4
6,40	3,2371	3,1960	4
6,32	3,1969	3,1558	4
6,24	3,1567	3,1156	4
6,16	3,1165	3,0754	4
6,08	3,0762	3,0352	4
6,00	3,0360	2,9950	3
5,92	2,9958	2,9548	3
5,84	2,9556	2,9146	3
5,76	2,9154	2,8744	3
5,68	2,8752	2,8342	3
5,60	2,8350	2,7940	3



---

5,52	2,7948	2,7538	3
5,44	2,7545	2,7136	3
5,36	2,7143	2,6734	3
5,28	2,6741	2,6332	3
5,20	2,6339	2,5930	3
5,12	2,5937	2,5528	3
5,04	2,5535	2,5126	3
4,96	2,5133	2,4724	3
4,88	2,4731	2,4322	3
4,80	2,4328	2,3920	3
4,72	2,3926	2,3518	3
4,64	2,3524	2,3116	3
4,56	2,3122	2,2714	3
4,48	2,2720	2,2312	3
4,40	2,2318	2,1910	3
4,32	2,1916	2,1508	3
4,24	2,1514	2,1106	3
4,16	2,1112	2,0704	3
4,08	2,0709	2,0302	3
4,00	2,0307	1,9899	2
3,92	1,9905	1,9497	2
3,84	1,9503	1,9095	2
3,76	1,9101	1,8693	2
3,68	1,8699	1,8291	2
3,60	1,8297	1,7889	2
3,52	1,7895	1,7487	2
3,44	1,7492	1,7085	2
3,36	1,7090	1,6683	2
3,28	1,6688	1,6281	2
3,20	1,6286	1,5879	2
3,12	1,5884	1,5477	2
3,04	1,5482	1,5075	2

---

2,96	1,5080	1,4673	2
2,88	1,4678	1,4271	2
2,80	1,4275	1,3869	2
2,72	1,3873	1,3467	2
2,64	1,3471	1,3065	2
2,56	1,3069	1,2663	2
2,48	1,2667	1,2261	2
2,40	1,2265	1,1859	2
2,32	1,1863	1,1457	2
2,24	1,1461	1,1055	2
2,16	1,1058	1,0653	2
2,08	1,0656	1,0251	2
2,00	1,0254	0,9849	1
1,92	0,9852	0,9447	1
1,84	0,9450	0,9045	1
1,76	0,9048	0,8643	1
1,68	0,8646	0,8241	1
1,60	0,8244	0,7839	1
1,52	0,7841	0,7437	1
1,44	0,7439	0,7035	1
1,36	0,7037	0,6633	1
1,28	0,6635	0,6231	1
1,20	0,6233	0,5829	1
1,12	0,5831	0,5427	1
1,04	0,5429	0,5025	1
0,96	0,5027	0,4623	1

Tabla 6.1. Cálculos tiempos GGH

Nótese que los valores de tiempos obtenidos tienen una relación lineal respecto el área a lavar, y por lo tanto al radio del GGH. No obstante, para cumplir con los tiempos de lavado calculados sería necesario lavar toda la corona circular a la vez, pero como se ha explicado esto no se realiza de esta forma, si no que la boquilla va avanzando a lo largo de ella. Esto es importante ya que implica que si por ejemplo el tiempo de lavado en una posición es 1,75

minutos y únicamente permanecemos ese tiempo lavando dicha posición de las cestas pasando inmediatamente a la siguiente posición quedará un sector del área sin lavar, ya que el GGH dará una vuelta completa y el 75 % de la segunda vuelta, por lo que hay un 25 % del área en esa posición que recibirá una cantidad insuficiente de agua. Es por ello que todas las posiciones de lavado han de recorrerse un número de vueltas entero.

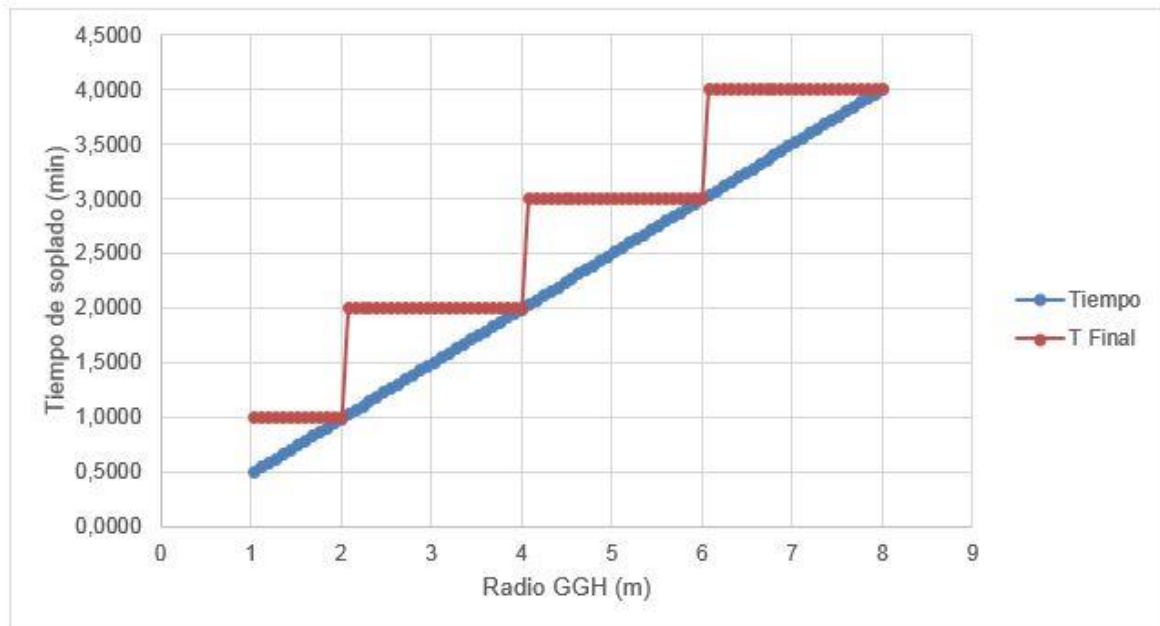


Imagen 6.4. Tiempo en recorrer Y en función del radio

Teniendo en cuenta que el GGH tarda 60 segundos en dar una vuelta completa, y que las boquillas tardan 1 segundo en avanzar a la siguiente posición, es decir, en recorrer la distancia X, el tiempo total que dura la limpieza es de 239 minutos, o lo que es lo mismo, 3,98 horas.

- Soplado con aire a baja presión

Al igual que con la configuración anterior, el modo de limpieza habitual será el soplado con aire a 6 bar de presión. La diferencia reside en la modificación de los tiempos que se ha desarrollado, pasando de 3 horas de duración de la secuencia a 4. De esta forma, y para seguir manteniendo una frecuencia de 3 limpiezas al día, cada lavado será realizado cada 6 horas en vez de cada 8. De la misma forma que antes, seguirá realizándose una limpieza alternativamente con cada soplador.

- Soplado con agua a baja presión

Esta opción de lavado también se mantiene igual que en la configuración anterior. Se empleará agua de servicio a 6 bar, y al igual que antes también será necesario que un operario cambie una brida del sistema de tuberías, haciendo que el agua circule por la misma tubería por la que circulaba el aire. Con esta opción el soplador de lado caliente sigue siendo multifunción, ya que únicamente se ha anulado el tramo de tubería de agua a alta presión, por lo que al igual que en el modo de limpieza de aire a baja presión la limpieza se realiza cada 6 horas alternativamente con cada soplador. No obstante, dada la experiencia obtenida con los sopladores anteriores, no se espera que este modo de limpieza se emplee de forma habitual, ya que con la limpieza con aire se obtienen unos resultados similares.

- Soplado con agua a alta presión

La limpieza con agua a presión se seguirá realizando de forma extraordinaria, puesto que expone a las cestas del GGH a un desgaste mucho mayor. Además, con la instalación de la nueva bomba con variador de frecuencia es posible realizar la limpieza a una presión de hasta 300 bar, lo cual reduce mucho el dP de las cestas. Para llevar a cabo esta limpieza, se considera que el área de limpieza de las boquillas es menor que en el caso de la limpieza con aire. Para simplificar el cálculo, se supone que el avance de la boquilla en cada paso disminuirá a la mitad, es decir, que la variable X que anteriormente consideramos que era 0,08 metros ahora será de 0,04, manteniendo el valor de Y en 0,1 metros. De esta forma, el tiempo total de limpieza será el doble: 478 minutos, o lo que es lo mismo 7,96 horas.

### **6.3.- CIRCUITO DE AIRE Y AGUA A PRESIÓN**

En el documento “Anexo 2: P&ID Circuito aire-agua actual” se muestra un plano del circuito de agua a alta presión, aire y aire de cierre que se utiliza en el GGH. Este plano representa la instalación actual, pero como se ha mencionado en el apartado anterior dicho circuito va a ser modificado.

La principal modificación consiste en anular la entrada de agua a alta presión del soplador del lado caliente, haciendo que éste opere exclusivamente con aire o agua a baja presión en los lavados diarios. Esto implica la anulación del tramo de tubería correspondiente del plano del Anexo 2.

Otra modificación importante que se realiza es el rediseño del tren de válvulas que permite modificar el circuito por el que se introduce el aire o agua que se usa para el lavado. Este tren de válvulas es de una complejidad relativamente alta, y ocasiona problemas debido a la gran cantidad de válvulas (de pequeño tamaño) existentes en la instalación. Esto es provocado principalmente por la suciedad a la que se ven expuestas continuamente, siendo difícil de prevenir, a pesar de encontrarse en el exterior del equipo y protegidas del ambiente.



Imagen 6.5. Tren de válvulas actual del circuito de aire-agua

De esta forma, se decide rediseñar dicho tren de válvulas, de forma que las líneas que alimentan cada soplador puedan operar de forma independiente, pudiendo abrir o cerrar el paso tanto de agua como de aire simplemente modificando la posición de una válvula en cada caso.



Por último, se modifica también la bomba actual que eleva la presión del agua hasta 150 bar, ya que no tiene la potencia suficiente para conseguir los 300 bar deseados en el nuevo ciclo de limpieza *OFF-line*. Además, la nueva bomba será instalada junto con un variador de frecuencia, pudiendo obtener presiones inferiores a 300 bar para poder realizar lavados a menor presión. Esto supone una gran ventaja respecto a la bomba actual, que sólo permite obtener 150 bar de presión “fijos”, y como ha demostrado la experiencia de lavados anteriores, cuanto mayor es la presión de lavado más se desgasta el esmalte de las cestas, por lo que es preferible realizar un lavado a 300 bar cada 6 meses que un lavado mensual a 150 bar, por poner un ejemplo.

La nueva bomba que se proyecta instalar es de desplazamiento positivo, de 150 CV de potencia (400 V y 50 Hz), con capacidad máxima de 300 bar de presión y 100 bar de presión nominal, y con la relación de caudales siguiente: 100 l/min a 100 bar, 135 l/min a 200 bar y 170 l/min a 300 bar. La bomba se colocará sobre la bancada existente, junto con el variador de frecuencia.

En la imagen a continuación se muestran las tres modificaciones principales que se han comentado resaltadas en tres colores diferentes sobre el plano del Anexo 2.

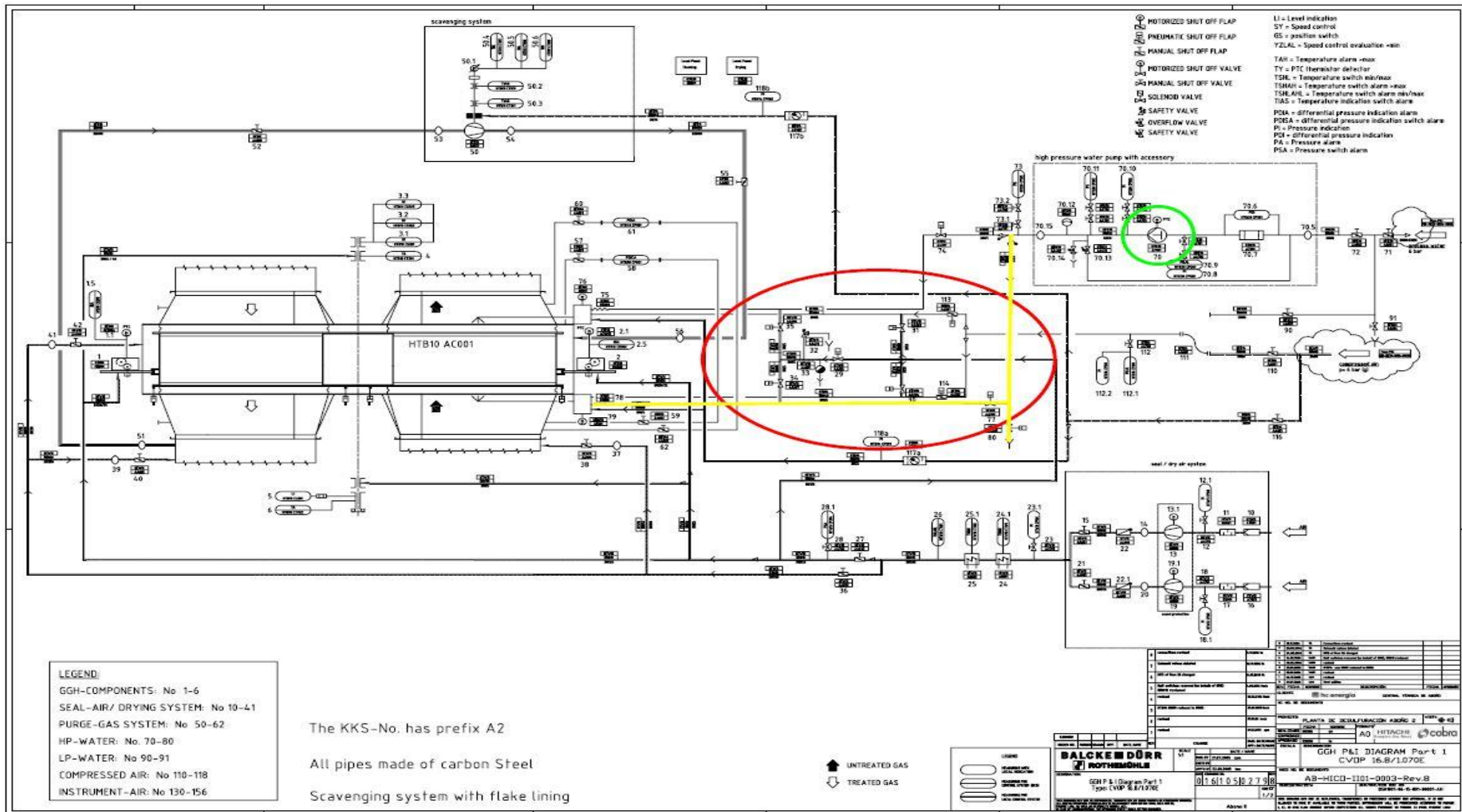


Imagen 6.6. Modificaciones a la instalación existente sobre los planos del Anexo 2

En la imagen a continuación se muestra en detalle la modificación al circuito de agua y aire.

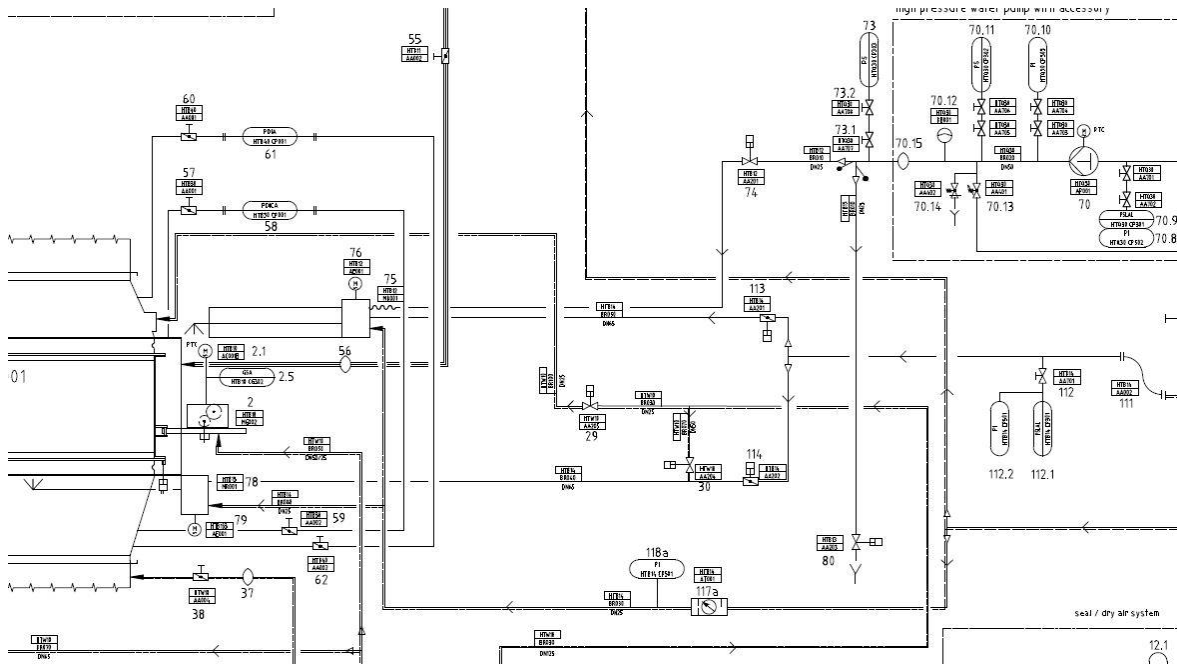


Imagen 6.7. Modificación del circuito de aire y agua

Se observa como se ha cambiado la representación del brazo de soplado del lado frío, situándose en el exterior del GGH para que se vea con mayor claridad la diferencia con el soplador del lado caliente, que permanecerá igual que estaba.

Se ha anulado el tramo de tubería de agua a presión del soplador del lado caliente, dejando el que sirve como drenaje para que en caso de necesidad se pueda extraer el fluido que pueda quedar dentro de alguna parte del recorrido. No obstante, aunque en el plano no se muestre dicho tramo, en la realidad simplemente se retirará la parte final de la tubería, cerrando la entrada de agua en el soplador para evitar fugas. Esto se hace así para ahorrar costes, y por si en un futuro se decidiese volver a activar la entrada de agua no tener que instalar un nuevo tramo de tubería, con el coste que ello ocasionaría.

En cuanto al tren de válvulas, únicamente se mantiene la válvula que controla la entrada de aire de cierre en el picaje de la tubería de entrada de aire de limpieza al soplador del lado caliente, además de las válvulas que controlan la entrada de aire y agua a las tuberías de alimentación (aunque no se considera que éstas formen parte del tren de válvulas).



Del mismo modo se mantiene la válvula que controlaba la entrada de aire de cierre a la tubería de alimentación de agua del soplador del lado frío, aunque ahora dicha tubería no va a un picaje de la propia tubería, si no que se inserta en el punto por donde entra la lanza del soplador en el GGH. Para ello, en el plano se muestra cómo es necesario modificar la estructura exterior del GGH para poder introducir la lanza desde el exterior, pudiendo realizar correctamente el cierre con aire de la forma descrita.

Esto es posible debido a que la instalación de un soplador en el exterior del GGH en el que la lanza permanece fuera del mismo cuando no está en funcionamiento implica que no es necesario tener dos picajes en sus tuberías de alimentación, ya que no hay la posibilidad de que los humos circulen en sentido contrario dañando la bomba de alta presión ni el compresor (además de reducir el rendimiento del GGH), bastando un único cierre con aire en el agujero por donde se introduce la lanza.

Todas las modificaciones realizadas se pueden observar en detalle en el documento “Anexo 3: P&ID Circuito aire-agua modificado”.

#### **6.4.- SISTEMA DE CONTROL DEL SOPLADOR**

Dentro del proyecto de Retrofit del soplador del GGH se incluyen las siguientes tareas correspondientes a la reprogramación del sistema de control del DCS:

- Eliminación de la parte de la lógica de control relacionada con el soplador a sustituir, las válvulas y la bomba de alta presión
- Programación adaptada al nuevo soplador y la nueva bomba de alta presión
- Modificación de la secuencia de arranque y operación
- Actualización de animaciones de SCADA

La lógica de control de la secuencia de soplado y lavado se realizará directamente en el DCS de la planta. El soplador dispondrá de un pequeño cuadro eléctrico local con un variador de frecuencia que controlará los movimientos de avance/retroceso de la lanza del soplador. El tipo de comunicación con DCS se definirá en fase de proyecto.

Los documentos “Anexo 4: Secuencia de soplado con aire actual” y “Anexo 5: Secuencia de soplado con agua actual” se corresponden a los diagramas de flujo de una instalación realizada en la planta de Los Barrios, Cádiz. Dicha instalación cuenta con dos sopladores retráctiles suministrados por Howden para la limpieza del GGH, operando de forma muy similar a lo deseado en la central térmica de Aboño. No obstante, es necesario realizar alguna modificación, ya que como se ha mencionado previamente en el presente TFM se va a instalar sólo un soplador (el del lado frío), manteniendo el brazo de soplado del lado caliente realizando únicamente el soplado con aire.

En el documento “Anexo 6: Secuencia de soplado con aire proyectada” se muestra la nueva secuencia de soplado de aire, realizadas las adaptaciones al nuevo brazo. En el documento “Anexo 7: Secuencia de lavado con agua proyectada” se muestra igualmente la secuencia de limpieza con agua. Para la correcta interpretación de dichas secuencias se indica la leyenda de los bloques empleados, tomando alguno como ejemplo:

PASO 4A  
CERRAR VÁLVULA  
AIRE DE CIERRE  
SOPLADOR  
SUPERIOR

Bloque de proceso. La acción que se indica dentro del bloque ha de ser realizada por el autómatas. No puede avanzar a otro bloque hasta completar dicha acción.

¿TIEMPO DEL  
TEMPORIZADOR  
EXPIRADO?

Bloque de decisión. La condición que se indica dentro del bloque puede ser verdadera o falsa. El autómatas le otorgará un valor y tomará el camino de dicho valor.

PASO 1  
ABRIR VÁLVULA TUBERÍA DE AIRE

Bloque de acción del operario. La acción que se indica dentro del bloque ha de ser realizada por un operador humano.

Si a un mismo bloque le llegan dos caminos, dicho bloque no puede comenzar a ejecutarse hasta que las acciones que indican los bloques que llegan a él no estén completadas. Es decir, dichos bloques anteriores se consideran variables de tipo “AND”.

## 7. Estructura

Una vez analizadas las características del brazo de soplado a instalar, el principal problema que subyace es determinar dónde instalarlo debido a su gran tamaño, que como se indica en el plano del Anexo 1 es de aproximadamente 8 metros de longitud.

La desulfuradora no es una instalación que formase parte del proyecto de la central térmica originalmente, si no que fue una modificación realizada a posteriori en 2007, y dado el gran tamaño de sus principales equipos (absorbedor, GGH, conductos de humos) fue instalada aprovechando el poco espacio que quedaba libre en las inmediaciones de la chimenea del Grupo II, realizándose la mayor parte en altura.

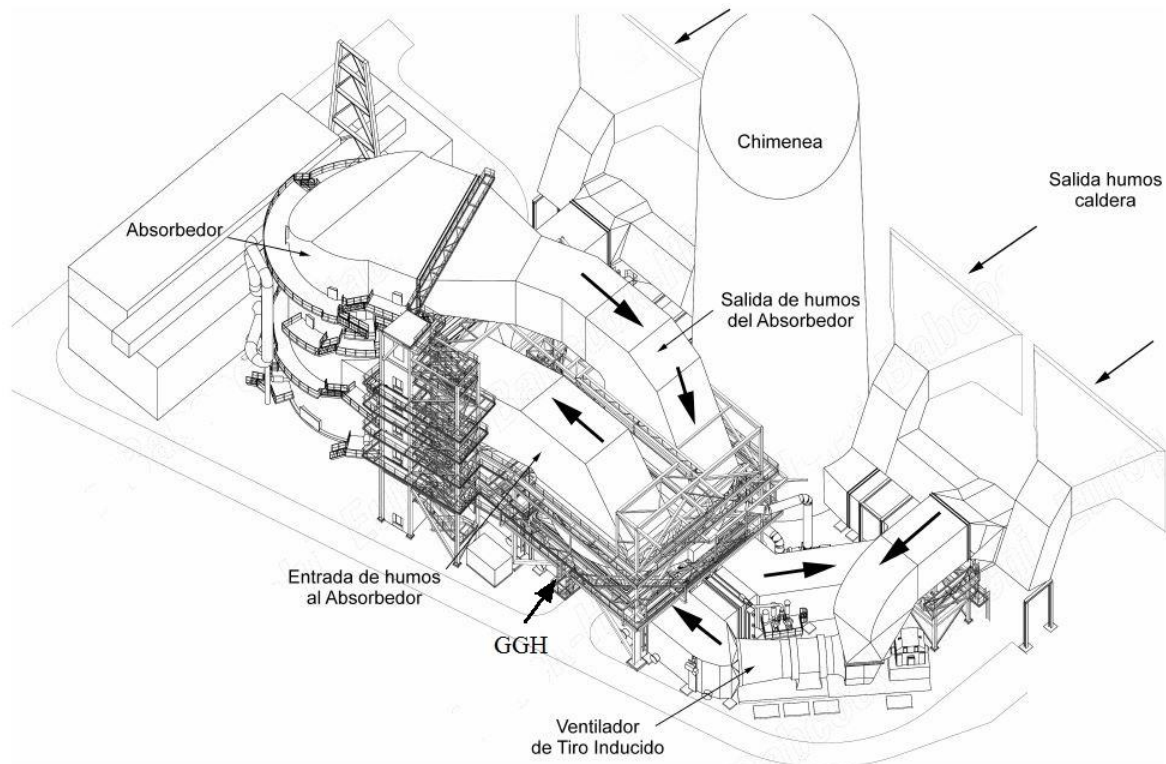


Imagen 7.1. Disposición de los principales equipos del sistema de humos

En la imagen anterior se muestra la dificultad que presenta la instalación actual para la incorporación de nuevos equipos. En la parte inferior se puede observar la existencia de una carretera. Dicha carretera supone un límite a la hora de realizar modificaciones, ya que es el único acceso rodado a esa parte de la planta, y por seguridad no resulta conveniente realizar la instalación de una estructura sobre la misma.

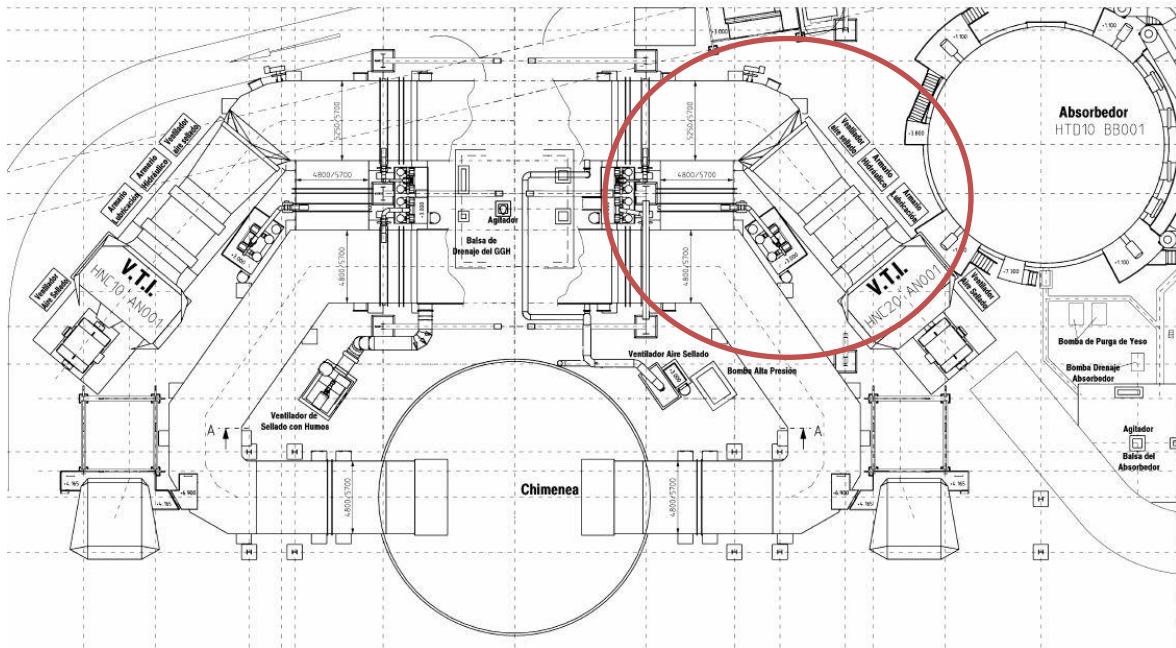


Imagen 7.2. Disposición en planta de estructuras en zona de chimenea

La zona resaltada en la imagen anterior parece la más adecuada para la instalación de una estructura que soporte el brazo de soplado. En el suelo, cota 0, se encuentra el VTI 2, mientras que el conducto de entrada de humos al absorbedor se encuentra en la parte superior del GGH, a una cota de 14 metros. Esto supone que en la zona perimetral del GGH en la altura a la que se encuentra (cota 9,5 - 14 metros) no está ocupada por ningún equipo ni instalación. Del mismo modo, la distancia entre el punto más cercano del GGH al absorbedor es superior a los 11 metros, lo cual supone un espacio suficiente para la longitud del brazo a instalar.

Teniendo en cuenta dichas consideraciones, se realiza un primer croquis de la estructura a instalar. Pensando en una posible modificación en un futuro, y aprovechando la inversión que se va a realizar, la estructura contará con 2 plataformas para soportar el brazo de limpieza de lado frío (superior) que se va a instalar, pero también una plataforma que soportaría un brazo de soplado idéntico en el lado caliente, por si se decidiese sustituir el actual.

Dicho croquis se puede observar en el “Anexo 8: Planteamiento estructura Aboño”.

Tanto la ingeniería de detalle como la instalación de la estructura forman parte del proyecto de retrofit del brazo de soplado, pero por motivos económicos dicha parte será sacada a oferta a diferentes empresas. A la fecha de realización de este TFM se han recibido ofertas,

que se encuentran actualmente en valoración por la dirección de la planta. Debido a la confidencialidad exigida por los ofertantes, y que la complejidad de dicha estructura se escapa al alcance del presente TFM, no se mostrarán planos de detalle de la misma y la valoración económica mostrada en el presupuesto general será la media de los presupuestos recibidos por los ofertantes para de ésta forma poder llevar a cabo un estudio de viabilidad económica del proyecto.

## 8. Valoración económica

### 8.1.- PRESUPUESTO GENERAL

A lo largo del presente TFM se ha destacado la importancia de la limpieza de las cestas del GGH, lo cual es un proceso crítico para la disponibilidad de la planta y garantizar el compromiso medioambiental de la empresa. Valores elevados de presión diferencial (dP) en las cestas del GGH implica alcanzar valores límite de operación y tener que rechazar GHA y/o limitar carga, lo cual supone importantes pérdidas de dinero.

El histórico de intervenciones (Apartado 4.2) demuestra que con la configuración actual del sistema de limpieza es preciso realizar una limpieza *OFF-line* cada 2 años. Del mismo modo también se puede observar como dichos lavados *OFF-line* no consiguen retirar el 100 % de las incrustaciones remanentes en las cestas, debido a que la presión de 150 bar no es suficiente y a que desde 2008 no se ha realizado ninguna actuación en las cestas, por lo que los anillos 8 y 9 (los más periféricos y de mayor superficie) presentan un deterioro importante.

De esta forma, en el presupuesto del proyecto además de la partida destinada a la modificación del brazo de soplado también se incluirá el presupuesto para la adquisición de las cestas correspondientes a los anillos 8 y 9.

Por motivos de confidencialidad no se indicará el nombre de las empresas a las que se solicita presupuesto de las diferentes partidas. Dicho presupuesto es provisional, pero resulta indicativo para el posterior análisis de viabilidad.

Ítem	Cantidad	Descripción	Precio
<i>INGENIERÍA DE DETALLE</i>			
1	1	Ingeniería de detalle (incluye generación de documentación)	55.500,00 €
<i>SUMINISTRO DE BIENES PRINCIPALES</i>			
2	1	Soplador Enerjet retráctil (incluyendo variador de frecuencia)	89.400,00 €
3	1	Bomba de agua a alta presión	54.000,00 €
4	1	Equipos adicionales (válvulas, filtros, ...)	24.000,00 €
5	1	Material para plataforma de soporte del soplador	51.600,00 €
6	1	Material para líneas de tuberías de agua y aire (incluyendo válvulas y tuberías de retorno al tanque de proceso)	24.200,00 €
7	1	Material eléctrico de control y potencia	39.800,00 €
8	1	Cestas GGH anillos 8 y 9	300.000,00 €
<i>INSTALACIÓN Y MONTAJE</i>			
9	1	Instalación del soplador (incluyendo puesta en marcha y formación al personal de EDP)	65.000,00 €
10	1	Recubrimiento de partes afectadas e instalación de andamios interiores	14.900,00 €
11	1	Instalación de la estructura de soporte del soplador	79.700,00 €
12	1	Instalación de líneas de tuberías de soplado de aire y agua (incluyendo válvulas y tuberías de retorno al tanque de proceso)	52.500,00 €
13	1	Instalación de material eléctrico de control y potencia. Conexión al DCS vía bus de comunicaciones	42.000,00 €
14	1	Reprogramación DCS para la nueva configuración	120.000,00 €
15	1	Sustitución cestas GGH anillos 8 y 9	85.000,00 €
<b>PRECIO TOTAL</b>			<b>1.097.600,00 €</b>

Tabla 8.1. Presupuesto general



## 8.2.- ANÁLISIS DE VIABILIDAD

Para analizar la viabilidad del proyecto se va a realizar una estimación de los costes que supone mantener el equipo en la situación actual, sin realizar ninguna modificación sobre él y compararlo con la inversión que se propone en el presente TFM. Para ello se emplearán datos de los lavados realizados entre 2012 y 2016, así como de diferentes costes.

- Costes asociados a los lavados

En la tabla mostrada a continuación se muestra el número de lavados realizados por los sopladores desde 2012 hasta 2016. Se muestra también el promedio de lavados realizados de cada tipo al año, así como el coste por año y tipo de lavado.

Año	2012	2013	2014	2015	2016	Promedio anual	Coste anual
Lavados <i>ON-line</i>	2	4	7	34	2	9,80	23.373
Lavados <i>OFF-line</i>	1	0	0	0	1	0,40	0

Tabla 8.2. Lavados realizados en el período 2012-2016

Para calcular el coste anual que suponen los lavados *ON-line* se considera que todos se realizan en MNT, lo cual corresponde a bajar carga desde MCR (550 MW) a MNT (285 MW) durante 9 horas de lavado. Para facilitar el cálculo, suponemos que la energía tiene un precio promedio de 10 €/MWh. De esta forma, obtenemos un coste unitario de 23.850 € por lavado.

No obstante, hay que tener en cuenta que normalmente el Grupo no se encuentra las 24 horas del día a plena carga, sino que está sujeto a la carga que demanda el mercado energético en cada momento. Es por ello que hay momentos en los que el consumo es menor, como por las noches o los fines de semana (debido por ejemplo a que muchas industrias no trabajan). Con el fin de obtener el mayor beneficio, y dado que las limpiezas son operadas de forma manual desde la sala de control, se procura programar las limpiezas en periodos en los que el Grupo se encuentra en MNT.

De esta forma, para el cálculo de costes y teniendo en cuenta la experiencia previa, se supone que sólo el 10 % del total de los lavados se han realizado en periodos de tiempo en los que el Grupo no estaba en MNT.

El cálculo del coste de los lavados *OFF-line* se realiza de forma similar, pero en este caso hay que tener en cuenta que siempre se aprovecha una RFC para su realización, ya que tiene una duración de como mínimo 3 días. Como hasta ahora dichos lavados se han llevado a cabo en periodos en los que el Grupo estaba parado, se va a considerar que su coste ha sido de 0 €.

- Costes asociados a las labores de mantenimiento

En la tabla a continuación se muestran los costes asociados a las labores mantenimiento (mecánico y eléctrico) en el período 2012-2016.

Año	2012	2013	2014	2015	2016	Coste anual
Costes mantenimiento (€)	37.373	5.217	23.702	69.303	323.858	91.890,60
Costes auxiliares (€)						3.900

Tabla 8.3. Costes asociados al mantenimiento en el periodo 2012-2016

También se indican los costes asociados al incremento del consumo de equipos auxiliares. Estos costes se producen al aumento del consumo eléctrico de los VTIs debido al colmatamiento de las cestas del GGH, ya que se produce un aumento de la dP y en consecuencia es necesario aumentar la potencia en los VTIs para que puedan extraer de igual forma los humos de la caldera. Para el cálculo se supone que un aumento de la dP en las cestas del GGH de 10 mbar implica un incremento de 1,3 MW en los VTI. Al igual que antes, se supone que el precio de la electricidad es de 10 €/MWh, por lo que viendo la gráfica del Apartado 4.2 del incremento del dP en las cestas del GGH se observa un incremento de 0,34 mbar/mes, originando por tanto un coste de 3.900 € al año.

- Costes asociados a rechazo de GHA / Carga

Tal y como se explicó en el Apartado 4.2, un valor de dP por encima de 11 mbar se considera alto, lo cual quiere decir que las cestas del GGH están muy sucias y por tanto ponen el riesgo el funcionamiento del Grupo (recordemos que el GGH es un equipo crítico). Por ello, para hacer que las cestas se ensucien menos se comentó que había dos alternativas a parar el Grupo: sustituir el consumo de GHA por el carbón necesario para producir las mismas termias, que dado su mayor PCS originará una menor cantidad de humos, o bien continuar quemando GHA pero reduciendo en 30 MW la carga del Grupo.

Dada la experiencia con los mecheros de GHA, se considera que el 70 % del tiempo que es necesario sustituir GHA por carbón o reducir la carga del Grupo se opta por sustituir GHA, y el otro 30 % se reduce la carga. Para calcular los costes de cada alternativa se tiene en cuenta que cada mechero tiene un consumo de 30.000 Nm<sup>3</sup>/h y que el PCS promedio del GHA es de 3.544 kJ/Nm<sup>3</sup>.

De esta forma es posible calcular las termias de GHA que se producen, siendo necesario sustituirlas por su equivalente en carbón. Si realizamos este cálculo de forma anual, y tomamos el precio del carbón en 0,01 €/th y del GHA en 0,004 €/th obtenemos un aumento de precio de 1.335.549 € por mechero, el cual supone 934.884 € el 70 % de las veces.

El coste de reducir 30 MW de carga durante el 30 % del año supone un coste de 788.400 €, considerando el precio de la electricidad de 10 €/MWh.

Observando de nuevo los valores de dP de la gráfica del Apartado 4.2, se ve cómo a partir de 2016 el Grupo se encuentra en valores altos, por lo que si no se realizan actuaciones es necesario operar sustituyendo el GHA / limitando carga. Teniendo esto en cuenta, a continuación se muestra el total de costes asociados al GGH.

Descripción	Coste (€)
Lavados <i>ON-line</i>	23.373
Lavados <i>OFF-line</i>	0
Costes mantenimiento	91.890
Costes equipos auxiliares	3.900
Rechazo GHA (70 % del año)	938.884
Limitación de carga (30 % del año)	788.400
<b>TOTAL</b>	<b>1.842.448</b>

Tabla 8.4. Resumen de costes asociados al GGH

Una vez analizados los costes, se concluye que la nueva instalación estará amortizada en un período aproximado de 9 meses, que teniendo en cuenta que la vida útil de una central térmica está en torno a 30 años representa un tiempo muy corto.

Por otra parte, si se produjese una colmatación de las cestas del GGH de forma repentina sería preciso realizar una parada del Grupo para proceder a su limpieza (o sustitución). Esto

implicaría una indisponibilidad de como mínimo 10 días, que teniendo en cuenta un MCR de 550 MW, un precio de la electricidad de 10 €/MWh y un coste adicional de lavado de las cestas realizado por una empresa externa de 75.000 €, supondría un total de 1.395.000 €, por lo que la amortización sería inmediata.

## 9. Conclusiones

En el presente TFM se analiza la problemática existente actualmente en la planta desulfuradora de la central térmica de Aboño, que tiene su origen en la colmatación de suciedad en las cestas del GGH. Una vez descrito el funcionamiento general de la central, de la planta y del propio equipo, se investiga sobre las particularidades de los brazos de limpieza, sus características, situación, funcionamiento, etc para a continuación evaluar las alternativas existentes.

La parte central del TFM se centra en el desarrollo de la solución que se propone adoptar, consistente en la sustitución del actual brazo de soplado del lado frío (superior) del GGH por un brazo de soplado retráctil, situado en el exterior del equipo. Dicha solución implica la adaptación del circuito de aire y agua que se usarán para el soplado de las cestas, la incorporación de una estructura que soporte el brazo a instalar y la adaptación de la lógica del DCS para el control de forma remota del nuevo equipo.

Así mismo, se propone modificar los modos de funcionamiento tanto del nuevo soplador retráctil a instalar en el lado frío (superior) como el antiguo soplador del lado caliente (inferior) para mejorar la eficiencia a la hora de lavar las cestas, haciendo hincapié en que todos los anillos sean limpiados por igual.

Por último se realiza una valoración económica de los costes que supondría la ejecución del proyecto, comparándola con los costes que implicaría no llevar a cabo ninguna modificación y continuar operando de la misma forma que hasta la actualidad. De esta forma se concluye que el proyecto es viable económicamente, estando amortizado en un periodo de tiempo relativamente corto.

# 10. Referencias

## 10.1.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Manuales de operación y mantenimiento. EDP: *Desulfuradora, Descripción general*, 2008. *Desulfuradora, GGH: Descripción del sistema*, 2008. *Desulfuradora, Enclavamientos y acciones automáticas*, 2009.
- *Apuntes de la asignatura “Equipos y motores térmicos”*. Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales, Curso académico 2014-2015, EPI Gijón. Campus Virtual de la Universidad de Oviedo.
- *Steam*. The Babcock and Wilcox Company, Gregory L. Tomei, Charlotte, North Carolina, USA, 2015.
- *FGD installations on coal-fired plants*. Soud, Hermine N. London IEA Coal Research, 1994.

## 10.2.- PÁGINAS WEB CONSULTADAS

- *Intranet de EDP*. <http://intranet.edpon.edp.pt/es/Paginas/HomePage.aspx>
- *Howden case studies*. <https://www.howden.com/en-gb/casestudies>
- *Babcock and Wilcox*. <http://www.babcock.com/products/sootblowers>

## 10.3.- REFERENCIAS LEGALES Y NORMATIVAS

- Real Decreto 430/2004, de 12 de marzo, por el que se establecen nuevas normas sobre limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones industriales de combustión, y se fijan ciertas condiciones para el control de las emisiones a la atmósfera de las refinerías de petróleo. “BOE” número 69, de 20 de marzo de 2004
- Plan Nacional de Reducción de Emisiones de las grandes instalaciones de combustión existentes. Versión final de octubre de 2007

- Resolución de 10 de noviembre de 2014, de la Consejería de Fomento, Ordenación del Territorio y Medio Ambiente, por la que se modifica y actualiza la autorización ambiental integrada de la instalación industrial “Central Térmica de Carbón de Aboño”, ocupando terrenos de los términos municipales de Carreño y Gijón. Expte. AAI-20/13. BOPA número 280 de 3-12-2014
- Directiva 2001/80/CE del Parlamento Europeo y del consejo, del 23 de octubre de 2001, sobre limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión



# 11. Anexos

Los documentos anexos al presente TFM y que se entregan junto con él son:

- ANEXO 1. Soplador Enerjet Howden
- ANEXO 2. P&ID Circuito aire-agua actual
- ANEXO 3. Circuito aire-agua modificado
- ANEXO 4. Secuencia de soplado con aire actual
- ANEXO 5. Secuencia de soplado con agua actual
- ANEXO 6. Secuencia de soplado con aire proyectada
- ANEXO 7. Secuencia de lavado con agua proyectada
- ANEXO 8. Planteamiento estructura Aboño

NOTA: Los anexos 1, 2, 4, 5 y 8 no son originales por parte del autor del presente TFM, no obstante se cuenta con el consentimiento por parte de la empresa para su uso. Por motivos de confidencialidad se han tapado los datos de la empresa.

