



Universidad de
Oviedo



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

**ÁREA DE MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS
DEPARTAMENTO DE ENERGÍA**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**PROGRAMACIÓN DE LA COMBUSTIÓN DEL HORNO Y
MODELO MATEMÁTICO DE UNA LÍNEA DE GALVANIZADO.
MEMORIA**

D. ALAIZ MIÑÓN, Álvaro

TUTOR: Dña. María José Suárez López

FECHA: junio de 2019

Resumen

La industria europea del acero vive en estos momentos una difícil situación que le plantea nuevos desafíos que sin duda deberá afrontar y que influirán de manera determinante en la solidez de su posición en el mercado global. El sector del automóvil, destino principal de los productos siderúrgicos, atraviesa también una situación complicada debido a las continuas restricciones impuestas por los gobiernos sobre la emisión de partículas contaminantes. Esto implica la necesidad continua de reducir el peso de los vehículos, cuya responsabilidad se traslada aguas arriba en la cadena de producto, demandando aceros más ligeros y que mantengan o mejoren sus propiedades mecánicas. Por otra parte, la competencia mundial en este sector es inmensa, para ello, las plantas europeas deben luchar por su supervivencia elaborando productos que cumplan con las exigencias del mercado, poniendo como eje principal la calidad, mejorando las ratios de productividad y reduciendo los costes operativos.

En este contexto se enmarca este Trabajo Fin de Máster, cuyos propósitos generales pasan por aumentar la productividad de una línea de galvanizado y mejorar la fabricación de un tipo específico de acero como son los *Dual Phase*. Esta gama de aceros presenta cierta complejidad en la fase de recocido continuo durante el proceso de galvanizado, en el cual se definen sus propiedades mecánicas finales. Se desea, por tanto, afinar dichas propiedades y disminuir los rechazos existentes llevando a cabo una revisión general del proceso de recocido.

Convirtiendo estas pautas en hechos concretos, se pretende analizar el funcionamiento de un equipo industrial real, un horno de recocido, enmarcado en una línea de producción de acero galvanizado, cumplimentando los siguientes objetivos:

- Conocer y comprender la programación electrónica del sistema de regulación y control, así como los elementos principales de regulación, sensores y actuadores, que intervienen en dicho sistema.
- Analizar y describir los problemas más frecuentes y significativos que se aprecien durante la operación de la línea y que sean inherentes al horno.
- Exponer o buscar soluciones a aplicar en la línea con el fin de solventar los fallos de comportamiento descritos previamente.
- Proponer mejoras en el sistema de regulación y un sistema de gestión de alarmas para aumentar el grado de automatización de la línea y reducir los tiempos de mantenimiento.

El trabajo ha sido desarrollado íntegramente en la empresa ArcelorMittal, concretamente en la Línea de Galvanizado Nº2 de Avilés, durante el periodo de prácticas correspondiente al último año del Máster en Ingeniería Industrial impartido por la Universidad de Oviedo. Estas prácticas tienen como propósito formar a estudiantes de máster a la vez que desarrollan un proyecto industrial real encargado por la propia empresa.

Abstract

The European steel industry passes through a difficult situation at present. It poses new challenges that must be faced and that will influence in a decisive way in the solidity of its future position in the global market. The automotive sector, which is the main destination of the steel products, also goes through complex circumstances due to the continuous environmental restrictions imposed by governments about the emission of polluting particles. That implies the constant needing of reducing the vehicles' weight, whose responsibility is transferred upstream in the product chain, demanding lighter steels that keep or improve their mechanical properties. On the other hand, global competition in this sector is so enormous that will force European plants to fight for its survival by designing products that comply with market demands and setting quality as the main axis while improving productivity ratios and reducing operating costs.

This Master's Thesis is framed in this context and its general mission consists in increasing the productivity of a galvanising line and progressing in the manufacturing process of a specific steel class, the *Dual Phase*. This type of steels presents a certain complexity in its continuous annealing phase during the galvanising process, in which the final mechanical properties are defined. Thus, it is desirable to refine these properties and reduce the existent rejections, carrying out an extensive revision of the annealing process.

Transforming these guidelines into concrete actions, se it is intended to analyse the operation of real industrial equipment, a continuous annealing furnace, located in a hot-dip galvanising line, fulfilling the following objectives:

- Learn and comprise the electronic programming of the regulation and control system, as the main elements of control, sensors and actuators, which take part in the aforementioned system.

- Analyse and describe the most significant and frequent problems appreciated during the daily line's operation and caused by the furnace.
- Present different solutions to apply them on the line in order to resolve the performance failures described previously.
- Propose some modifications of the control system along with an alarm management system intended to increase the line's automation degree and to reduce maintenance time.

The project has been entirely realized in the company ArcelorMittal, particularly at Hot Dip Galvanising Line 2 in Avilés, during the internship period corresponding to the last year of the Master's Degree in Industrial Engineering imparted by the University of Oviedo. These practices were organised to train university students while they develop a real industrial project requested by the same company.

Índice general

1.- Introducción	10
1.1.- ANTECEDENTES	10
1.2.- OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO.....	10
2.- El Proceso de Galvanizado	13
2.1.- INTRODUCCIÓN A LOS RECUBRIMIENTOS	13
2.2.- DESCRIPCIÓN DE LA LÍNEA DE GALVANIZADO	14
2.3.- HORNO DE RECOCIDO	19
3.- Análisis del sistema.....	25
3.1.- DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE REGULACIÓN Y CONTROL	25
3.1.1.- SENSORES.....	26
3.1.2.- ACTUADORES	29
3.1.3.- CONTROLADORES	35
3.2.- ESTUDIO GENERAL DEL COMPORTAMIENTO.....	43
3.2.1.- DIFERENCIA SIGNIFICATIVA ENTRE CONSIGNA Y MEDICIÓN DE TEMPERATURA.....	43
3.2.2.- FALLOS EN LA MEDIDA DE OXÍGENO	44
3.2.3.- FALLOS EN REGULACIÓN DE VÁLVULAS.....	44
3.2.4.- FALLOS EN QUEMADORES	45
3.2.5.- FIABILIDAD DE LA MEDIDA DEL CAUDAL DE HUMOS	47
3.2.6.- FIABILIDAD DE LA MEDIDA DE LOS PIRÓMETROS.....	48
3.3.- ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO CON ACEROS DP	51
3.3.1.- INTRODUCCIÓN A LOS ACEROS DP	51
3.3.2.- PROBLEMAS RELACIONADOS CON LOS ACEROS DP	54

4.- Análisis de mejoras	55
4.1.- MEJORAS EN EL SISTEMA DE REGULACIÓN Y CONTROL.....	55
4.1.1.- CORRECCIÓN DE ERRORES DEL SISTEMA.....	55
4.1.2.- PROPUESTA DE MEJORA DEL SISTEMA DE REGULACIÓN	57
4.1.3.- PROPUESTA DE MEJORA DEL MODELO MATEMÁTICO.....	60
4.2.- SISTEMA AUTOMATIZADO DE ALARMAS	61
4.2.1.- ESTRATEGIA DE ACTUACIÓN.....	62
4.2.2.- NECESIDADES DE EQUIPOS	65
4.2.3.- IMPLANTACIÓN DE OSPC.....	65
5.- Conclusiones y trabajos futuros	67
5.1.- CONCLUSIONES	67
5.2.- TRABAJOS FUTUROS.....	69
6.- Bibliografía	71
7.- Anexos.....	74

Índice de figuras

Figura 2.1. Esquema de los equipos que componen la sección de entrada. (© ArcelorMittal).....	15
Figura 2.2. Esquema de los equipos que conforman la sección de proceso. (© ArcelorMittal).....	17
Figura 2.3. Esquema de los equipos que se encuentran en la sección de salida. (© ArcelorMittal).....	18
Figura 2.4. Gráfica temperatura – longitud de bobina de un ciclo típico de recocido.	20
Figura 2.5. Plano esquemático de un tubo de tipo W. (© ArcelorMittal).....	23
Figura 2.6. Esquema de un tubo de tipo doble P. (© WS - Wärmeprozestechnik GmbH).....	23
Figura 3.1. Caudalímetro de gas existente antes de la válvula de gas de cada zona.	27
Figura 3.2. Imagen de la sonda de oxígeno Land con el equipamiento electrónico a la izquierda.	28
Figura 3.3. Imagen de la sonda de oxígeno BOSCH, denominada en la planta como <i>Locox</i>	29
Figura 3.4. Válvula de regulación de gas.	30
Figura 3.5. Válvula reductora de presión.	31
Figura 3.6. Válvulas de seguridad de gas.....	31
Figura 3.7. Sistema de válvulas de gas de los pilotos de una zona.	32
Figura 3.8. Válvula de humos de la Zona 5, a la izquierda se observa el sensor de oxígeno.	33
Figura 3.9. A la izquierda, imagen del conjunto quemador Bloom 2320; a la derecha, detalle de la boquilla del gas y el piloto. (© Bloom Engineering)	34

Figura 3.10. Imagen del quemador REKUMAT® M250. (© WS Wärmeprozessechnik GmbH).....	34
Figura 3.11. Extracto del diagrama funcional del Modelo Matemático del horno que muestra un ejemplo de regulación para una supuesta zona de 5 quemadores. (© Drever International S.A.).....	41
Figura 3.12. Visualización de los diferentes estados de los quemadores en la pantalla de operación. [9]	42
Figura 3.13. Esquema del horno con la colocación de los pirómetros.	49
Figura 3.14. Esquema del ciclo de recocido que se realiza en el horno con los puntos de medición de los 4 pirómetros principales. (© ArcelorMittal).....	50
Figura 3.15. Esquema de medición pirométrica en esquina.	50
Figura 3.16. Ejemplo del uso de diferentes grados de Aceros DP en elementos de la carrocería de un automóvil del fabricante Saab. [15].....	52
Figura 3.17. Diagrama de clasificación de familias de aceros según su resistencia y elongación o alargamiento. (© ArcelorMittal).....	52
Figura 3.18. Esquema del proceso de laminación en caliente para aceros DP. [14]	53
Figura 4.1. Esquema de la regulación de humos modificada.	58
Figura 4.2. Esquema de la regulación de gas modificada.....	59
Figura 4.3. Captura de la pantalla de visualización del operador del Modelo Matemático.	61
Figura 4.4. Esquema básico del diagrama de detección de fallos (se incluye en el Anexo 4 para facilitar la visualización).	64

Índice de tablas

Tabla 2.1. Características técnicas de la Línea de Galvanizado N°2 de Avilés.	14
Tabla 2.2. Características técnicas del horno de recocido de la línea N°2.	20
Tabla 2.3. Datos técnicos de capacidad de caudal de gas y potencia por zonas.	21
Tabla 2.4. Datos de los quemadores del horno. [2]	22
Tabla 3.1. Parámetros básicos de los bloques de regulación.....	36
Tabla 3.2. Relación de entradas del bloque de Reg. Cruzada.	37
Tabla 3.3. Relación de salidas del bloque de Reg. Cruzada.....	37
Tabla 3.4. Tabla para el cálculo de la relación Humo/Gas.	39
Tabla 3.5. Listado de los diferentes estados de los quemadores de las zonas 11 y 12. [9].....	42

1.- Introducción

1.1.- ANTECEDENTES

El departamento de Recursos Humanos en colaboración con otros departamentos del clúster de ArcelorMittal Asturias lanzó un programa de prácticas dirigido a formar a estudiantes universitarios en su último año de máster, concretamente para las especialidades de Ingeniería Industrial e Ingeniería de Minas. El objetivo era llevar a cabo las prácticas en una instalación de la empresa a la par que se realizaba el Trabajo de Fin de Máster (TFM), dentro de un plazo de cinco meses que transcurrirían durante el primer semestre del año 2019. Éste es uno de los proyectos seleccionados dentro de ese programa, realizado en el Departamento de Recubiertos, concretamente en la Línea de Galvanizado Nº2 de la planta de Avilés.

Antes de entrar en detalles, es conveniente tener en cuenta que este trabajo se realiza con dos fines diferentes pero entrelazados. El primero de ellos es servir como Trabajo de Fin de Máster, proyecto imprescindible para culminar el Máster en Ingeniería Industrial. El segundo objetivo está ligado al entorno empresarial en el que se ha realizado este proyecto, y consiste en realizar una recopilación del conocimiento existente sobre un equipo industrial, así como la elaboración de proposiciones de mejora por parte del autor.

1.2.- OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO

Este trabajo pretende estudiar y analizar el funcionamiento del horno de recocido de la línea de galvanizado número 2 de la planta de ArcelorMittal de Avilés. El proceso de puesta en marcha de la línea y del sistema de regulación posee ciertas peculiaridades:

- La construcción de la línea se realizó en el año 1999, llevándose a cabo la instalación del horno por la empresa belga *Drever International*

(actualmente integrada dentro del grupo SMS). Sin embargo, el sistema de regulación y control del horno lo realizó la empresa española *Ingeteam*, siguiendo un modelo de regulación de nivel 1 ya implantando previamente en un horno de características similares en la planta de Sagunto.

- Desde el mismo inicio se implantó un modelo de regulación de nivel 2 simple que incluía un control de las temperaturas del horno.
- En el año 2008 se implantó un nuevo sistema de regulación de nivel 2, que actualmente se denomina Modelo Matemático, que regula los principales parámetros de funcionamiento del horno como son temperaturas de zona, temperatura de la banda, velocidad de la banda, potencias de enfriamiento y diversas correcciones.

Debido a estas peculiaridades, existían varios problemas relacionados con la comprensión del funcionamiento general del sistema de regulación y de la comunicación entre el nivel 1 (nivel de campo, PLCs) y el nivel 2 (ordenador de proceso). Los problemas principales se mencionan a continuación:

- No se conocía con exactitud el esquema de regulación de nivel 1 del sistema de regulación y control del horno. Existía un plano basado en el modelo implantado en el horno de la planta de Sagunto y otro plano que mostraba un esquema electrónico del lazo de regulación, pero presentaba varios errores.
- No se podían monitorizar todas las variables deseadas puesto que no estaban incluidas en el sistema de análisis y monitorización de variables de proceso.
- No se conocía en detalle el funcionamiento del ordenador de proceso de nivel 2 para el horno (Modelo Matemático) debido al sistema ideado por

Drever, funcionando el modelo como una “caja negra” en el que no se conoce la programación realizada.

- Existían ciertos problemas en el funcionamiento del horno que no se podían solventar debido a la falta de conocimiento del sistema de regulación y, por otra parte, se producían a menudo fallos en la comunicación y funcionamiento del nivel 2 que no eran atajados ya que nadie había entrado en contacto con el departamento de Informática de Procesos para tratar el tema en profundidad.

Tras conocer el estado inicial de la línea en general y la parte del horno en particular, resumido anteriormente, se han fijado los siguientes objetivos que servirán de guía para la elaboración de este proyecto.

1. Conocer, a partir del plano de regulación electrónica y el analizador de variables, el funcionamiento real del sistema de control de nivel 1, implementando las correcciones oportunas.
2. Incorporar al programa de análisis de variables todas aquellas que sean necesarias para monitorizar el comportamiento del horno.
3. Conocer el funcionamiento de la regulación del ordenador de proceso de nivel 2. Para ello, se contactará con el departamento de Informática de Procesos, IdP, para que aporte la información necesaria al respecto.
4. Proponer mejoras y/o correcciones del sistema de regulación de nivel 1 para que cumpla con las consignas que le pide la línea, así como para conocer los posibles fallos de funcionamiento y comunicarlos al personal correspondiente, ya sea de operación o mantenimiento.
5. Comunicar los fallos de nivel 2 observados al departamento de Informática de Procesos y colaborar con ellos en adoptar la mejor solución posible.

2.- El Proceso de Galvanizado

Antes de entrar en materia sobre el tema concreto sobre el que versa este trabajo, se procederá a realizar un resumen para explicar en qué consiste el proceso de galvanizado, una descripción general del esquema de la línea de galvanizado objeto de este trabajo y, por último, un desarrollo sobre el funcionamiento del horno recocido, que es el equipo concreto que se va a analizar.

2.1.- INTRODUCCIÓN A LOS RECUBRIMIENTOS

Debido a los problemas de corrosión y oxidación, a los metales como el acero se les debe aplicar algún tipo de recubrimiento como forma de protección. La corrosión aparece en entornos húmedos y con presencia de oxígeno; por otro lado, la oxidación se produce en entornos oxidantes y se agrava con el calor. Ya que no es posible evitar la oxidación a altas temperaturas, los metales resisten la oxidación hasta una cierta temperatura. Por tanto, el problema crucial a atajar en los metales es el de la corrosión. Existen diferentes variedades de recubrimientos para atajarla, pudiendo clasificarse en dos principales grupos: protección catódica y protección anódica.

- En la protección anódica el metal base actúa como ánodo, siendo el metal de recubrimiento más noble (menos electronegativo) que el metal a proteger, por lo que ejerce un efecto de barrera frente a la corrosión. Un ejemplo son los recubrimientos de acero con estaño, la hojalata.
- En la protección catódica el recubrimiento metálico es menos noble que el metal base, actúa como ánodo de sacrificio y se corroe primero. Este es el caso de los recubrimientos galvánicos, que toman como base el Zinc, aunque también se emplean aleaciones de Zinc y otros metales como Aluminio, Silicio o Magnesio.

- Adicionalmente se pueden añadir recubrimientos no metálicos como la aplicación de sistemas de pintura, los cuales pretenden aislar la superficie metálica de los factores adversos del entorno, aunque pueden llegar a degradarse por la acción de los rayos solares, acelerando incluso la corrosión.

Existen varios métodos de aplicación de estos recubrimientos según el proceso de fabricación: electrolíticos, por inmersión en caliente, por deposición en vacío y/o metalización. La instalación en cuestión realiza un recubrimiento galvánico mediante inmersión en caliente. [1]

2.2.- DESCRIPCIÓN DE LA LÍNEA DE GALVANIZADO

La Línea de Galvanizado Nº2 de la planta de ArcelorMittal de Avilés se construyó en 1999. Sus capacidades y especificaciones principales se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Características técnicas de la Línea de Galvanizado Nº2 de Avilés.

Capacidad de producción		550.000 Tm./año
Formatos extremos	Espesor	0,4 – 2,2 mm
	Ancho	750 – 1.600 mm
	Diámetro Interior	508 – 610 mm
	Diámetro Exterior	2.150 mm
	Peso máximo bobina	35 Tm
Velocidades máximas	Entrada, Proceso, Salida	200, 160, 200
Sección de Limpieza	Tipo	Electrolítica
	Potencia	9.600 A
Horno	Tipo	Vertical (tubos radiantes)
	Potencia calentamiento	36.006 kW
Acumuladores	Entrada	364 m
	Salida	300 m
Temper/skin-pass	Número de cajas	1
	Elongación	0 – 2%

El esquema general de una línea de galvanizado se divide en tres partes: la sección de entrada, la de proceso y la de salida. A modo de aclaración, la división de la línea que aquí se hace en tres secciones no concuerda con la realizada en la Tabla 2.1, puesto que la velocidad de 200 m/min sólo se puede desarrollar en dos tramos: entre las desbobinadoras y el acumulador de entrada y entre el acumulador de salida y las bobinadoras, en el resto la máxima velocidad es 160 m/min.

- Sección de entrada. Comprende la parte de proceso desde la entrada de bobinas hasta la entrada de la banda en el horno. Está formada por los equipos que muestra la Figura 2.1 y que se comentan posteriormente.

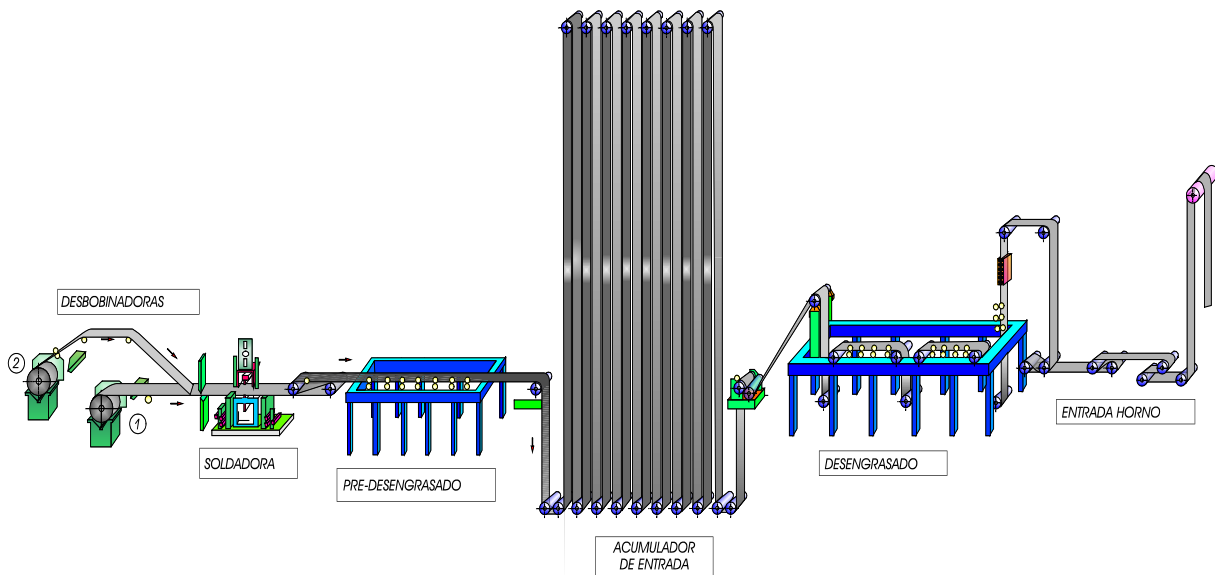


Figura 2.1. Esquema de los equipos que componen la sección de entrada. (© ArcelorMittal)

- Desbobinadoras. Las dos existentes constituyen el punto inicial del proceso y a través de ellas se proporciona a la línea el material que se va a tratar. Esta línea se alimenta de bobinas laminadas en frío, proceso que se sitúa aguas arriba en el flujo del proceso siderúrgico. Es posible realizar cortes o “saneos” a las bobinas mediante una tijera

para eliminar partes defectuosas en la parte inicial o final de las mismas.

- Soldadora. Permite la operación continua del proceso mediante el soldado de dos bandas. Posteriormente se comprueba la calidad de dicha soldadura mediante dos sistemas: el primero es la denominada prueba del martillo, la cual consiste en impactar la banda con un martillo para comprobar que la unión es correcta; adicionalmente existe un sistema automatizado de control de calidad de la soldadura denominado Q-WELD. Asimismo, se realiza un entallado de la banda para facilitar el proceso de rebordeado al final del proceso y para eliminar las partes externas de la soldadura, que son las más críticas en cuanto a una rotura de la soldadura.
- Pre-desengrasado. Este equipo, que actualmente se encuentra en desuso, realizaría una limpieza previa de la banda si existieran ciertas condiciones desfavorables durante el proceso de laminación en frío en el tándem.
- Acumulador de entrada. Permite almacenar hasta 364 metros de material. Esto garantiza una continuidad de material en la línea, aunque existan cambios de velocidad o paradas para inspección.
- Desengrasado. Limpia la banda mediante agua desmineralizada, detergentes químicos y un proceso de electrólisis. El motivo de ello es eliminar los restos de aceites, grasas y otras impurezas que se pudieran producir durante la laminación en frío y que pudieran obstruir la fase de recubrimiento.
- Sección de proceso. Es la parte central del proceso, comprende desde la entrada en el horno hasta la salida de la banda una vez que ha sido recubierta

y se le ha otorgado la rugosidad superficial. En la Figura 2.2 se muestran todos los equipos que la componen.

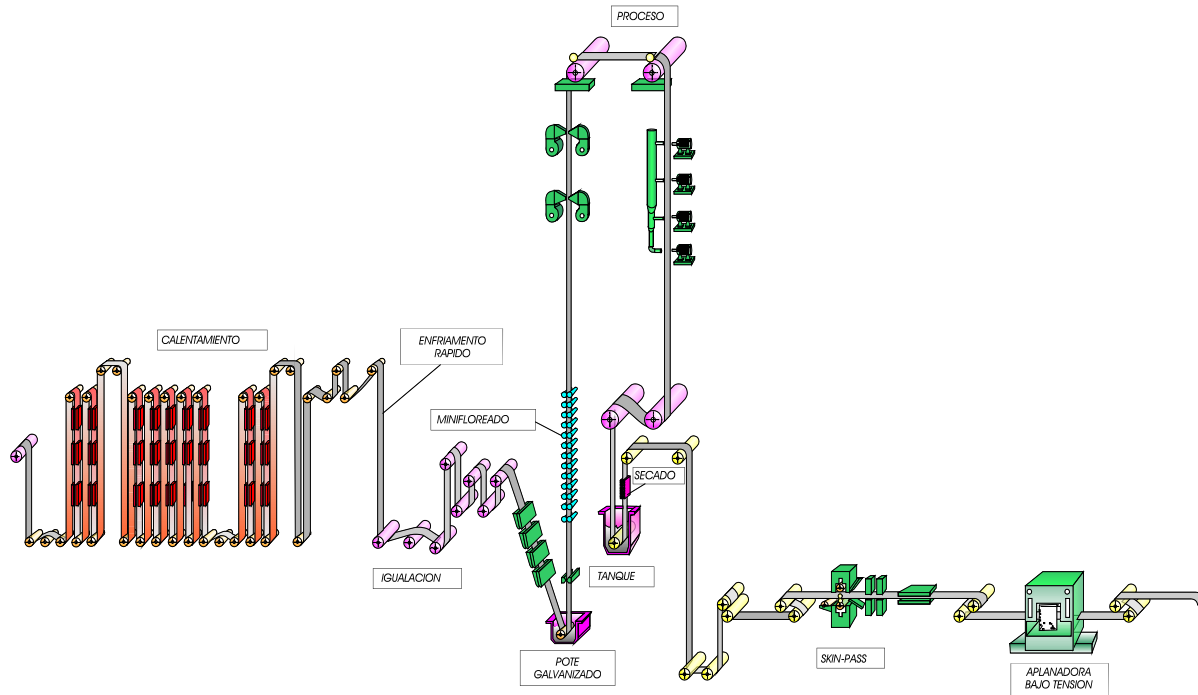


Figura 2.2. Esquema de los equipos que conforman la sección de proceso. (© ArcelorMittal)

- Horno de recocido. Horno de tipo vertical que realiza un proceso de recocido para eliminar la acritud (pérdida de ductilidad y maleabilidad) originada durante la laminación en frío y facilite el proceso posterior de recubrimiento, dejando la banda con una temperatura de entre 450-460°C. Posee cuatro secciones principales: precalentamiento, calentamiento, enfriamiento lento y enfriamiento rápido.
- Pote de recubrimiento. En él se encuentra el material que se va a depositar sobre la banda, generalmente Zinc con un pequeño porcentaje de Aluminio para conformar la capa intermetálica entre acero y recubrimiento. Existen múltiples recubrimientos con el Zinc como base que combinan en diferente medida otros elementos como

Aluminio, Magnesio o Silicio. El recubrimiento se encuentra de forma líquida en el pote y se adhiere a la banda mediante inmersión, posteriormente se regula el espesor de recubrimiento mediante unas cuchillas de soplado.

- Enfriamiento. Existe una torre de 54 metros de altura sobre la que se disponen varios elementos de enfriamiento.
- *Skin-pass*. También denominado témpér, dota a la banda de la rugosidad superficial demandada por el cliente y afina las características mecánicas del galvanizado. Algunos aceros requieren un enfriamiento previo a este proceso para evitar el envejecimiento, el cual se realiza en un equipo denominado BAC.
- Aplanadora. Otorga a la banda las condiciones de planitud deseadas mediante el paso por unos rodillos imbricados.
- Sección de salida. Comprende las operaciones finales de tratamiento químico, inspección y bobinado. Se muestra en la Figura 2.3. Los elementos que la componen se describen a continuación.

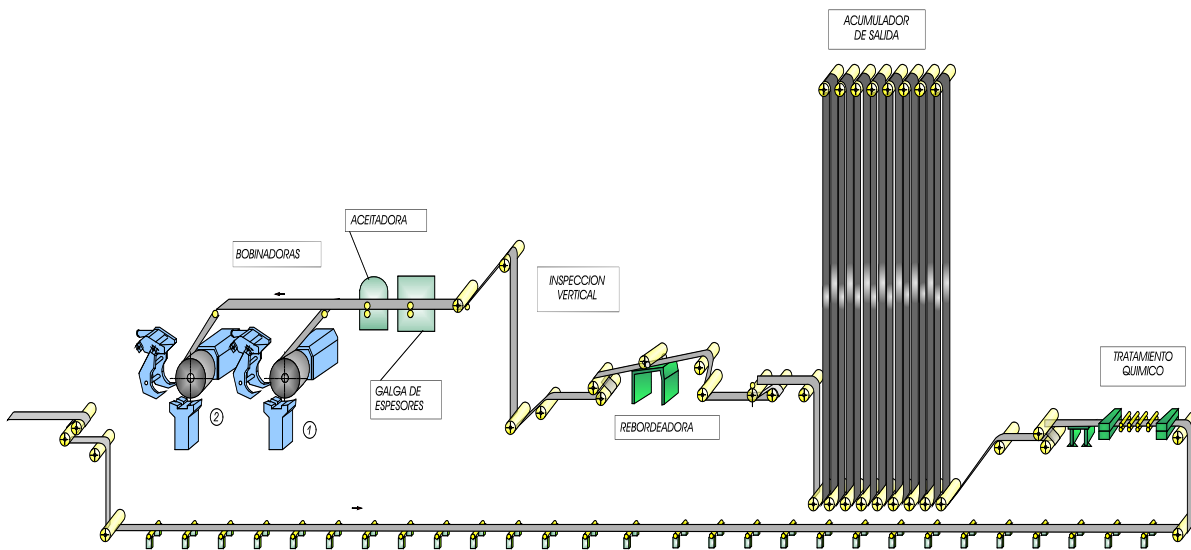


Figura 2.3. Esquema de los equipos que se encuentran en la sección de salida. (© ArcelorMittal)

- Tratamiento químico. Se aplica el tratamiento de cromatado al material destinado a la industria. Dicho tratamiento protege a la banda de la aparición de óxido y repele el agua.
- Acumulador de salida. Garantiza la continuidad del proceso en la salida y tiene capacidad de almacenamiento de 300 metros de banda.
- Rebordeadora. Recorta los bordes de la banda para cumplir con los estrictos requerimientos de ancho demandados por el cliente.
- Inspección. Existe un sistema de inspección y detección de defectos automatizado y compuesto por múltiples cámaras denominado *Parsytec*. Además, en esta zona los operadores realizan una inspección ocular.
- Aceitadora electrostática. Se aplica un recubrimiento de aceite como protección al material destinado a la automoción.
- Bobinadoras. La banda se corta mediante una tijera y se bobina al final del ciclo mediante dos bobinadoras. Esta es la parte final del proceso de galvanizado.

2.3.- HORNO DE RECOCIDO

Como ya se ha mencionado antes brevemente, el horno de recocido es un elemento clave en el proceso de galvanizado. Su principal objetivo es efectuar un ciclo de recocido a la banda para dotarla de una ductilidad y maleabilidad que ha perdido durante el proceso de laminación en frío, cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 2.2. De forma general, en el horno se llevan a cabo los siguientes procesos:

- Realización de un ciclo de recocido de hasta 900°C mediante tubos radiantes con quemadores alimentados por gas natural. En el proceso de recocido y

con el enfriamiento posterior se definen las propiedades mecánicas finales. Se puede observar el desarrollo de varios ciclos de recocido en la Figura 2.4.

- Volatilización de aceites y grasas que no se han eliminado en el desengrasado.
- Reducción del óxido superficial.
- Mantenimiento de una temperatura en la banda de entre 450-460 °C a la salida, antes de entrar en el pote, para facilitar el recubrimiento por inmersión.

Tabla 2.2. Características técnicas del horno de recocido de la línea N°2.

Fabricante	<i>Drever International</i>
Tipo	Vertical
Quemadores	Tubos radiantes (tipos W y doble P)
Potencia de calentamiento	36.006 kW
Combustible	Gas Natural
Número de tubos	201
Número de zonas de tubos	12

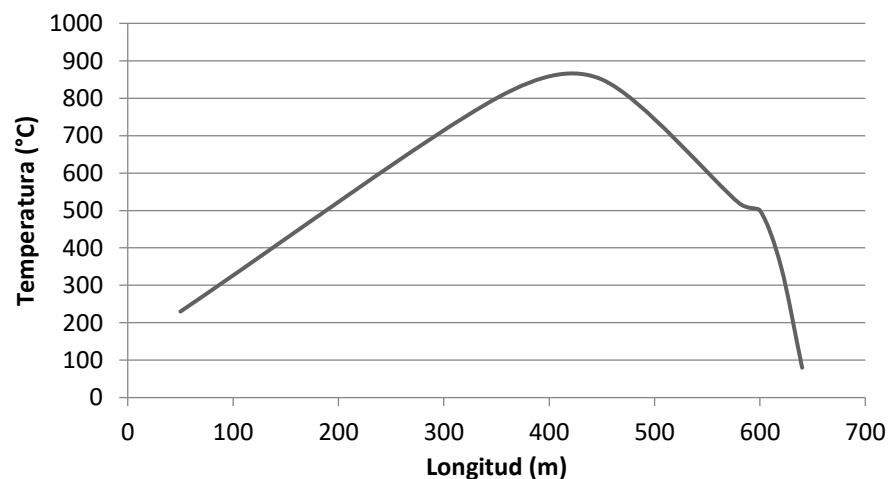


Figura 2.4. Gráfica temperatura – longitud de bobina de un ciclo típico de recocido.

El horno está dividido en cuatro secciones principales que se proceden a detallar, así como sus funciones. En el Anexo 1 se puede observar en las figuras 1 y 2 dos planos esquemáticos del horno.

- Precalentamiento. Precalienta la banda hasta los 250-300°C con el calor residual de los gases de combustión de la zona de calentamiento. Dicho calor se transfiere mediante dos intercambiadores de tubos, a través de los cuales se recircula una mezcla de gas HNx por medio de ventiladores. Este gas es soplado hacia lo que constituye la zona de precalentamiento del horno.
- Calentamiento. Existen 12 zonas de tubos radiantes, 10 de ellas están formadas por tubos en forma de W y 2 de ellas poseen tubos tipo doble P. Estos tubos fueron añadidos en las dos últimas zonas de la sección de calentamiento del horno (anteriormente denominada mantenimiento) tras una reforma que se acometió en 2008 con el fin de aumentar la potencia calorífica. Las características de cada tipo de tubo y capacidades de las zonas se indican en la Tabla 2.3 y Tabla 2.4.

Tabla 2.3. Datos técnicos de capacidad de caudal de gas y potencia por zonas.

Zona	Caudal Nominal (Nm ³ /h)	Número de tubos	Caudal por tubo (Nm ³ /h)	Potencia (kW)
1	452	26	17,38	4830,2
2	383	22	17,41	4087,1
3	313	18	17,39	3344,0
4	262	15	17,47	2786,7
5	348	20	17,40	3715,6
6	278	16	17,38	2972,4
7	282	16	17,63	2972,4
8	246	14	17,57	2600,9
9	211	12	17,58	2229,3
10	211	12	17,58	2229,3
11	252	18	14	2520,0
12	168	12	14	1680,0
TOTAL	3406	201	17,48	35968

Tabla 2.4. Datos de los quemadores del horno. [2]

Tipo de tubo	W	Doble P
Número de tubos	171	30
Caudal de gas (Nm ³ /h)	17,4	13,2
Potencia de calentamiento (kW)	186	160
Funcionamiento	Carga variable	Todo-nada
Eficiencia	55 – 60%	65 – 70%

Cada tipo de tubo posee distintas características y operan de forma distinta; cabe indicar que la regulación de carga se puede realizar de forma parcial en los tubos de tipo W (Figura 2.5) mientras que los doble P (Figura 2.6) poseen dos modos de funcionamiento (apagado o encendido). Ambos tipos de tubo aprovechan los gases de combustión para precalentar el aire y, en el caso de los doble P, la eficiencia es mayor debido a que emplean el sistema FLOX® (*Flameless Oxidation*) mediante quemadores recuperativos REKUMAT® M 250. Este sistema permite desarrollar una combustión estable sin llama, lo que se traduce en un aumento de la eficiencia y una reducción de la formación de NO_x, siendo en su momento la mejor tecnología disponible (en inglés BAT – *Best available techniques*) desde una perspectiva medioambiental [3, 4].

Aunque se denomina tubo al conjunto, en realidad, los tubos están compuestos por una carcasa metálica y por un quemador que se encuentra en la parte inicial del tubo (ver parte superior de la Figura 2.5) y que produce la combustión. Los quemadores poseen a su vez un quemador principal y un quemador piloto que se mantiene siempre encendido para garantizar la existencia de una llama y la combustión del gas existente.

- Enfriamiento lento. Se inyecta una mezcla de gas HNx (compuesto por un 5% de H₂) a través de 7 pares de tubos ranurados distribuidos en 2 áreas verticales, una de bajada y otra de subida, situadas después de la parte de calentamiento. Esta mezcla de gas se recircula mediante dos ventiladores (uno por zona) y a través de dos intercambiadores de tubos por los que se hace circular agua en circuito cerrado, que es enfriada mediante unas torres de refrigeración situadas en el exterior de la línea.
- Enfriamiento rápido. En esta sección se emplean 6 cajones de soplado repartidos en 3 áreas por los que se inyecta gas HNx con hasta un 15% de H₂ tras la reforma de 2008. Ya que las necesidades de enfriamiento son mayores en esta zona, se emplean 6 circuitos de enfriamiento con ventilador e intercambiador de tubos (un circuito por cada cajón) con un funcionamiento similar al mencionado en el apartado anterior. La capacidad de refrigeración se sitúa en torno a 20°C/s.

3.- Análisis del sistema

En este capítulo se procederá a desarrollar un análisis completo del sistema de regulación y control del horno de recocido, detallando lo máximo posible las entradas que recibe de los sensores colocados a nivel de campo, las órdenes que recibe del ordenador de proceso de nivel 2 y las órdenes que envía a los actuadores. Una vez conocido el funcionamiento, se estudiará el funcionamiento de forma general, haciendo hincapié en los casos más problemáticos con el objeto de buscar posibles soluciones o mejoras que, serán comentadas en el último apartado.

3.1.- DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE REGULACIÓN Y CONTROL

Como se ha comentado en la Introducción (capítulo 1.-), no se conocía el plano exacto del sistema de control. No obstante, existía un esbozo del modelo de control que se pretendía implantar en el horno, el cual difería en algunos aspectos del plano final. El plano final se fue elaborando por parte del equipo de mantenimiento eléctrico de la planta según se iba analizando el contenido de la programación electrónica del horno. El primer cometido de este proyecto era revisar dicho plano e informar de los errores que existieran para elaborar una versión final corregida. Por otro lado, era preciso hacer una separación entre la regulación de nivel 1 y el nivel 2, para discernir qué parte se encargaba de cada función.

El objetivo general del horno, como ya se ha mencionado, es proporcionar un ciclo de recocido a la banda de acero; ello se traduce en una consigna de temperatura al final de la zona de calentamiento (salida de la Zona 10). Para garantizar que se alcanza esa temperatura al final de la banda, el ordenador de proceso envía consignas de temperatura a cada zona en función de las características de la banda (tipo de acero, espesor, ancho, calidad...). Toda esta regulación se realiza en el nivel 2, pero los sensores y actuadores se encuentran en el nivel 1, éstos se proceden a describir a continuación según su función.

Cabe mencionar que solamente se incluyen aquellos elementos de control que influyen directamente en la regulación y algunos elementos de seguridad importantes relacionados con el manejo del gas natural. Todos los sensores y actuadores descritos envían o reciben las consignas mediante señales eléctricas con el rango estándar de 4 a 20 mA, que se transforman según corresponda en medidas de presión, caudal, oxígeno, etc. Esta comunicación se realiza a través de PLCs dentro del nivel 1 de regulación.

3.1.1.- SENSORES

3.1.1.1.- Sensores de temperatura

Para la regulación de temperatura existen los siguientes tipos de sensores:

- Regulación de zona. Dos termopares en cada zona del horno proporcionan la medición de temperatura de la misma excepto en las zonas 9 y 10, que podría considerarse que están mezcladas y ambas se regulan a través de los mismos termopares.
- Regulación de tubos. Existen termopares dispuestos aleatoriamente por los tubos con el fin de medir la temperatura alcanzada en los tubos ya que existen limitaciones de operación por exceso de temperatura. Los tubos de las zonas 11 y 12, que poseen quemadores más avanzados, disponen cada uno de dos termopares. Si no coincide la medida de ambos, el sistema no permite que se enciendan. En el Anexo 1 se puede observar en la Figura 3 un plano con la disposición de los tubos que poseen termopares.
- Regulación de humos. Existe un par de termopares que miden la temperatura de humos en cada colector de zona y en el general.

3.1.1.2.- Sensores de presión

Existen sensores de presión en el colector de humos de cada zona y en el colector general con la función de controlar el caudal de humos a través de la depresión que existe en la salida de los mismos.

3.1.1.3.- Sensores de caudal

Existe un caudalímetro en cada zona como el que se muestra en la Figura 3.1 para controlar el flujo de gas que se suministra a cada zona.



Figura 3.1. Caudalímetro de gas existente antes de la válvula de gas de cada zona.

3.1.1.4.- Sensores de oxígeno

En cada colector de zona existe una sonda de oxígeno que mide el porcentaje de oxígeno de los gases de combustión. La colocación de sondas de medición de oxígeno se debe a que es necesario controlar el nivel de oxígeno en los tubos por requerimiento del proceso (se fija un valor objetivo del 4% de oxígeno en los humos). Existen dos modelos de sondas para realizar esta tarea:

- El modelo más antiguo, empleado en todas las zonas excepto en la 2 y 3, es una sonda de la marca Land AMETEK y modelo Genesis WDG 1200 que se puede ver en la Figura 3.2 [5].
- El nuevo modelo que se ha colocado de forma experimental en las zonas 2 y 3 es el Sensor Lambda BOSCH LS 17025 [6] que aparece en la Figura 3.3, conocido popularmente en la planta como sonda *Locox*, acrónimo de *Low Cost Oxygen*. Este nuevo modelo de sondas proporciona una medición más rápida y su coste es sustancialmente menor que las del tipo Land. Experimentalmente, también se han colocado en la zona 2 sondas de oxígeno que miden por subcolector, es decir, los gases de combustión recogidos de los tubos de un mismo piso (los tubos radiantes están distribuidos por pisos verticalmente en el horno).



Figura 3.2. Imagen de la sonda de oxígeno Land con el equipamiento electrónico a la izquierda.



Figura 3.3. Imagen de la sonda de oxígeno BOSCH, denominada en la planta como *Locox*.

3.1.1.5.- Detectores de encendido de quemadores pilotos

Todos los tubos tipo W existentes en el horno, colocados en las zonas de la 1 a la 10, poseen un detector de encendido del piloto. Este detector, de tipo ionizante, realiza la detección en función del amperaje de la llama. Los tubos tipo doble P de las zonas 11 y 12 poseen un sistema diferente de control de llama y temperatura que se describirá más adelante.

3.1.2.- ACTUADORES

3.1.2.1.- Válvula reguladora de gas

Existe una válvula por zona que regula el caudal de gas que se introduce en la misma, el cual se distribuye uniformemente por todos los tubos de la zona. La válvula es de tipo mariposa con apertura variable y carece de un medidor de posición. El modelo concreto de válvula es Masoneilan 35002 Series Camflex™ Rotary Control Valve, cuya imagen se aprecia en la Figura 3.4 [7].



Figura 3.4. Válvula de regulación de gas.

3.1.2.2.- Válvulas de seguridad de gas

Existen dos elementos de seguridad en cada zona que también funcionan como actuadores y, aunque no intervienen en la regulación principal, son elementos adicionales que garantizan el cumplimiento de unas condiciones seguras de funcionamiento que requiere el gas natural. Estos elementos son:

- Válvula reductora de presión (ver Figura 3.5). Garantiza una estabilidad de presión en la válvula de gas de 150 mbar, para aislarla de oscilaciones en las tuberías de gas.
- Válvulas de seguridad. El conjunto de las dos válvulas que se ven en la Figura 3.6 aseguran el cierre efectivo de la tubería de gas para aislar de forma segura el conducto en caso de fallo en el circuito de gas.



Figura 3.5. Válvula reductora de presión.



Figura 3.6. Válvulas de seguridad de gas.

3.1.2.3.- Válvulas reguladoras de gas de los pilotos

Los quemadores poseen unos pilotos que se mantienen siempre encendidos quemando gas para garantizar el buen desarrollo de la combustión. Existe un piloto por quemador que posee una válvula que regula el gas que se introduce, siendo esta regulación todo-nada. Estas válvulas son elementos auxiliares y garantizan el buen desarrollo de la combustión en los tubos, no intervienen en la regulación de la carga del horno. Cada válvula suministra el gas para los pilotos de una zona, el conjunto de válvulas del horno se puede ver en la Figura 3.7.



Figura 3.7. Sistema de válvulas de gas de los pilotos de una zona.

3.1.2.4.- Válvula de humos

Existe una válvula en cada zona que regula el caudal de humos que se extrae de ella e, indirectamente y de forma conjunta con la de gas, el aire introducido en cada tubo. La regulación es de tipo *pull*, por lo que con dos válvulas se regulan tres parámetros (aire, gas y humos). La válvula es de tipo mariposa, apertura variable y no posee medidor de posición.



Figura 3.8. Válvula de humos de la Zona 5, a la izquierda se observa el sensor de oxígeno.

3.1.2.5.- Quemadores

Constituyen un elemento actuador secundario, puesto que el actuador principal es la válvula reguladora de gas. El objetivo de los quemadores es realizar la combustión de la mezcla gas-aire en el interior del tubo mediante una bujía. Existen dos modelos de quemadores según el tipo de tubo:

- Quemador recuperativo Bloom 2320 para los tubos tipo W (ver Figura 3.9). Este quemador admite una regulación parcial de la carga y precalienta el aire con el calor residual de los gases de combustión [8].
- Quemador recuperativo REKUMAT® M250 (ver Figura 3.10) para los tubos tipo doble P. Posee un sistema de recuperación del calor de los gases de escape más eficiente que el quemador Bloom. Opera sin regulación parcial de la carga mediante dos modos de combustión: modo llama y modo FLOX®, el cual reduce la emisión de gases NOx (se activa a partir de 850 °C) [2].

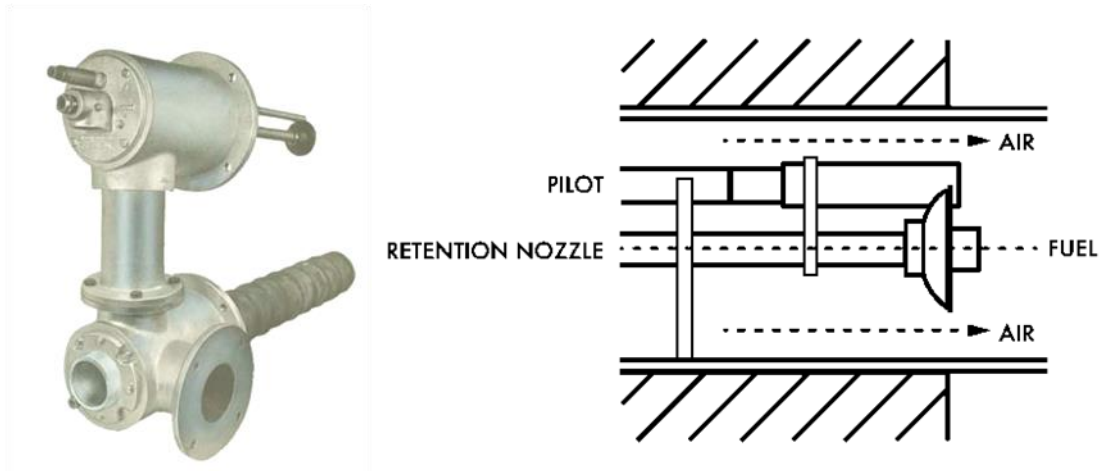


Figura 3.9. A la izquierda, imagen del conjunto quemador Bloom 2320; a la derecha, detalle de la boquilla del gas y el piloto. (© Bloom Engineering)



Figura 3.10. Imagen del quemador REKUMAT® M250. (© WS Wärmeprozessestechnik GmbH)

3.1.2.6.- Exhaustores

Existen dos ventiladores de tiro inducido en la salida del colector general de humos y antes de la chimenea de escape para mantener una depresión constante en el colector general de humos que no altere el proceso. Estos ventiladores reciben una consigna fija de depresión y regulan su intensidad en función del sensor de presión colocado en el colector general.

Para las zonas 11 y 12 existe un exhaustor adicional que realiza la misma función pero de forma específica para esas zonas, que poseen una regulación diferente.

3.1.3.- CONTROLADORES

El sistema de control consiste en cinco bloques de regulación PID, cada uno regula un parámetro diferente. Un controlador PID es un mecanismo de control realimentado en bucle usado ampliamente en el control industrial de procesos. Mediante un cálculo continuo del error entre un valor consignado (SP) y una variable del proceso (PV), se genera una respuesta correctora basada en términos proporcionales, integrales y derivativos (de ahí la nomenclatura P, I y D respectiva). Los bloques existentes en el sistema son los siguientes:

- Regulación de Gas. Controla el caudal de gas que se introduce en la zona.
- Regulación de Humos. Controla el caudal de humos que se extrae de cada zona con el fin de controlar, indirectamente, el caudal de aire que se introduce.
- Regulación de Temperatura. Convierte la consigna de temperatura de zona en una señal porcentual de carga de gas.
- Regulación de la Corrección de Oxígeno. Su objetivo es mantener un porcentaje de oxígeno en los gases de combustión por encima de una consigna (en este caso un 4%). Se necesita ese exceso para garantizar con un cierto margen una atmósfera oxidante en el interior del tubo y, por tanto, evitar la formación de algunos compuestos que dañarían el tubo.
- Regulación Cruzada. Controla de manera conjunta el caudal de gas y el caudal de humos para asegurar que: al aumentar la carga la válvula de humos abre antes que la de gas y, al reducir la carga, la válvula de gas cierra primero que la de humos.

3.1.3.1.- Regulación de gas, humos, temperatura y corrección de oxígeno

El funcionamiento de los cuatro primeros bloques es relativamente sencillo. Todos reciben un *set point* (SP) que comparan con la medición de un sensor, denominado *process value* (PV o AV). Como resultado del proceso de control PID, se consigna una salida que recibe un actuador u otro bloque de control. En la Tabla 3.1 se resume el funcionamiento de estos cuatro primeros bloques cuyo plano completo se incluye en el Anexo 3.

Tabla 3.1. Parámetros básicos de los bloques de regulación.

Bloque	SP	AV	Salida
Reg. de Gas	Consigna de caudal de gas	Medición del caudalímetro de gas	Consigna de apertura de la válvula de gas
Reg. de Humos	Consigna de caudal de humos	Cálculo del caudal de humos	Consigna de apertura de la válvula de humos
Reg. de Temperatura	Consigna de temperatura de zona	Medición de los termopares de zona	Consigna del bloque de Reg. Cruzada
Reg. de Corrección de Oxígeno	Porcentaje de oxígeno deseado en cada zona	Medición de la sonda de oxígeno de zona	Consigna del bloque de Reg. Cruzada

3.1.3.2.- Regulación cruzada

El quinto bloque, denominado de regulación cruzada porque regula varios parámetros de manera entrelazada, es el más complejo y posee sub-bloques internos con varias funciones. En la Tabla 3.2 se muestra un listado de las entradas y salidas más relevantes para el control y su relación con los nombres que figuran en el plano que se incluye en el Anexo 2.

Tabla 3.2. Relación de entradas del bloque de Reg. Cruzada.

Entradas	
SP. MM	Consigna de temperatura de zona procedente de nivel 2 (modelo matemático)
AV. TEMPERATURA	Medida de los termopares de zona
COEF. CORREC. CARGA	Corrección de la carga de zona (deshabilitado)
CAUDAL NOMINAL	Valor del caudal nominal de gas de cada zona (varía según la zona)
AV. CAUDAL GAS	Medición del caudalímetro de gas
SAL. REG. TEMP.	Salida del bloque de Reg. de Temperatura
CORREC. ORD.	Señal de corrección de carga procedente del nivel 2
Nº QUEMADORES ON	Medida del sensor de detección de quemadores encendidos
Nº QUEMADORES ZONA	Valor fijo del número de quemadores totales de cada zona (varía según la zona)
AV. CAUDAL HUMOS	Cálculo basado en una fórmula experimental implantada por <i>Drever</i> para medir el caudal de humos
RELACIÓN HUMO/GAS	Consigna de la relación volumétrica entre el caudal de humos y el caudal de gas. Existe una tabla predefinida que relaciona el porcentaje de oxígeno con esta relación
SAL. REG. OXIGENO	Consigna del exceso de oxígeno deseado según el Reg. de Corrección de Oxígeno

Tabla 3.3. Relación de salidas del bloque de Reg. Cruzada.

Salidas	
SP. TEMP	Consigna del Reg. de Temperatura
SP. REG. HUMOS	Consigna del Reg. de Humos
SP. REG. GAS	Consigna del Reg. de Gas
AV. REG. HUMOS	Valor calculado del caudal de gas para cumplir con las condiciones de oxígeno deseadas
AV. O2 CORREGIDO	Porcentaje de oxígeno corregido en función del exceso de oxígeno requerido (regula alarma y apagado de zona)
AV. O2 CALCULADO	Porcentaje de oxígeno calculado en función del número de quemadores encendidos. AV del Reg. de Corrección de Oxígeno

Existen dos sub-bloques internos que son los que realmente controlan los caudales de gas y humos de forma directa y, de forma indirecta, el caudal de aire. Estos bloques son de selección de entradas en función del valor máximo/mínimo:

- Selector de máximo. Escoge el valor máximo entre el caudal de gas medido y el caudal de gas deseado (porcentaje de carga multiplicado por el caudal nominal). Como salida, envía la consigna al regulador de humos (SP. REG. HUMOS).
- Selector de mínimo. Escoge el valor mínimo entre el caudal de gas deseado (en función de la carga) y el caudal de gas que cumple con las condiciones de oxígeno requeridas. Envía la consigna al regulador de gas (SP. REG. GAS).

La explicación de la existencia de estos dos sub—bloques y su modo de funcionamiento se detalla a continuación y se debe a motivos de seguridad. Cuando la carga está en aumento, primero se va abriendo la válvula de humos y después se procede a abrir la de gas. Por el contrario, cuando se reduce la carga primero se va cerrando la válvula de gas y después la de humos. Con este procedimiento se garantiza que el gas, en el caso de una combustión deficiente, tenga capacidad suficiente de escape y no quede acumulado en el tubo pudiendo provocar una explosión. Dentro de este bloque también se realizan otras funciones de cálculo para obtener variables intermedias de proceso o salidas. Los procesos más importantes se describen a continuación:

- Cálculo del caudal de humos. Se realiza un cálculo del caudal de humos (AV. CAUDAL HUMOS en el plano) mediante una fórmula experimental diseñada por la empresa *Drever*, fabricante del horno. La fórmula emplea la temperatura y presión del colector de humos, el caudal de gas actual y nominal y otras constantes.

$$Q_{humos} = K1 \cdot \sqrt{\frac{(P \cdot \frac{273}{T + 273})}{1 + K2 \cdot (1 - (Q_{gas_actual} - Q_{gas_nominal}))}} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

- Cálculo de la relación Humo/Gas. Existe una tabla también definida por el fabricante para calcular la relación teórica entre el caudal de humos y el caudal de gas en función del exceso de aire – oxígeno – deseado según figura en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Tabla para el cálculo de la relación Humo/Gas.

Porcentaje de exceso de oxígeno	Relación Humo/Gas teórica
0%	11,29
4%	13,47
5%	14,18
6%	14,99
7%	15,91
8%	16,98

- Corrección de la Relación Humo/Gas teórica en función de la corrección de oxígeno requerida. Cuando la medición de oxígeno cae por debajo del 4%, entra en juego el corrector de oxígeno demandando introducir un exceso de aire. Esto se realiza de una forma algo compleja que se indica a continuación y puede observarse en el plano correspondiente de la Reg. Cruzada.
 - El Regulador de la Corrección de Oxígeno indica el grado de corrección necesaria según la salida que emite (SAL. REG. OXIGENO según plano) en una escala porcentual, del 0 al 100.
 - En función de esta corrección se calcula un coeficiente corrector de la Relación Humo/Gas (COEF_CORREC_O2 en el plano) que va en una escala del 1 al 1,15.

- Dicho coeficiente de corrección de oxígeno multiplica a la relación Humo/Gas teórica (SP. HUMO/GAS según plano), obteniéndose la relación Humo/Gas corregida (SP. HUMO/GAS CORREGIDO).
- Al dividir el caudal de humos calculado (AV. CAUDAL HUMOS) entre la Relación Humo/Gas corregida se obtiene el caudal que posteriormente regula la válvula de humos (AV. REG. HUMOS).
- Corrección de la medida de oxígeno que. Se realiza una corrección de oxígeno sobre la medida que realiza la sonda en función del número de quemadores encendidos. Esto se debe a que si existiera algún quemador abierto – apagado –, por él entraría solamente aire (21% de oxígeno) y se estaría alterando la medida del resto de tubos. Esta fórmula, como es lógico, no es exacta y se obtuvo en base a la experimentación e investigación de la empresa *Drever*.

3.1.3.3.- Medidas de precaución

Se denomina “fallo grave” cuando se produce el apagado de una zona y se impide el rearme de la misma hasta que transcurran 20 minutos desde el apagado cuando suceden los siguientes supuestos:

- La medida de uno de los termopares de zona supera los 980°C.
- La medida de uno de los termopares de tubo supera los 990°C.
- La media de uno de los termopares situados en el colector de humos supera los 730°C.

En otros casos solamente se produce el apagado de la zona cuando se incumplen ciertas condiciones establecidas:

- La medición de la sonda de oxígeno del colector de humos desciende por debajo del 0,5%.

- La medición del caudal de gas de cada zona supera un valor máximo prefijado por cuestiones de seguridad.

3.1.3.4.- Regulación de las zonas 11 y 12

La regulación de dichas zonas se realiza de forma diferente al resto de zonas. Los quemadores de esas zonas funcionan como elementos todo-nada y la regulación de carga se realiza modificando el tiempo de encendido de cada quemador, según el esquema de la Figura 3.11. La información de este apartado se completa en el diagrama funcional del horno redactado por *Drever* [9].

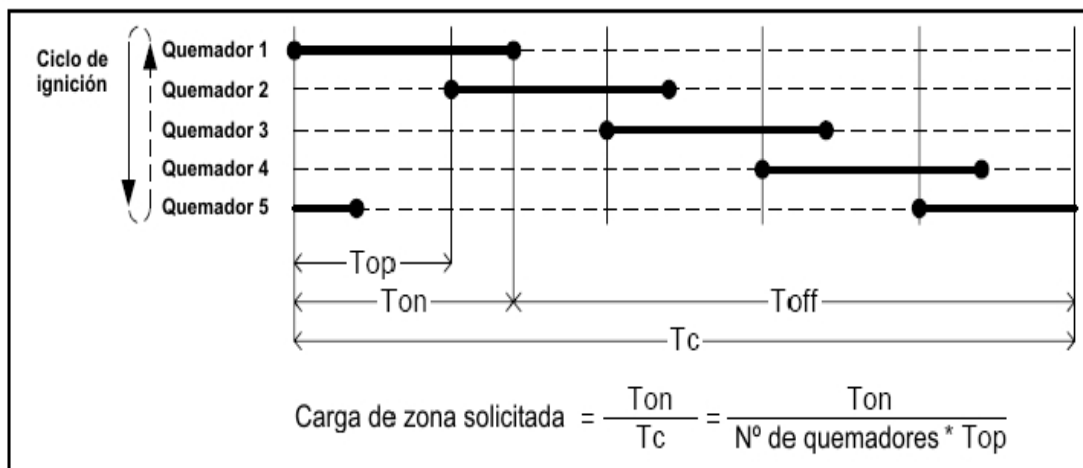


Figura 3.11. Extracto del diagrama funcional del Modelo Matemático del horno que muestra un ejemplo de regulación para una supuesta zona de 5 quemadores. (© Drever International S.A.)

Los quemadores de estas dos zonas poseen un funcionamiento más complejo que el resto, para ello existe un código de colores que indica el estado del quemador en cada momento. En la Figura 3.12 y la Tabla 3.5 se puede ver la visualización de los distintos estados de los quemadores en la pantalla del *software* "Operator", así como la definición de cada estado según el diagrama funcional de *Drever*.

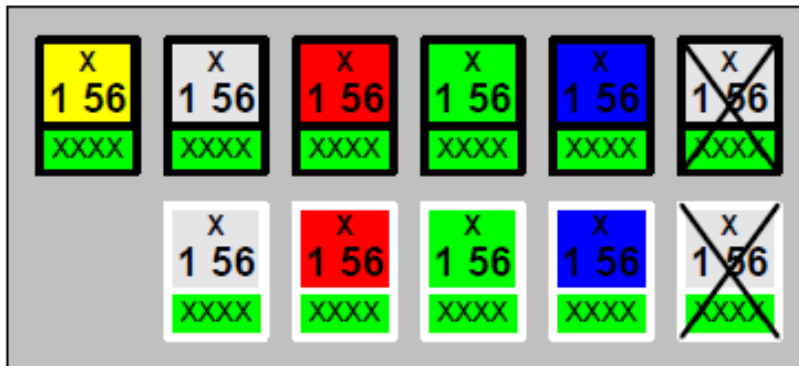


Figura 3.12. Visualización de los diferentes estados de los quemadores en la pantalla de operación. [9]

Tabla 3.5. Listado de los diferentes estados de los quemadores de las zonas 11 y 12. [9]

Status	Animación
Dispositivo control de llama "CBFF" no está en ON	Tachado
Fallo	Rojo
Quemador OFF	Gris claro
En funcionamiento	Verde
Enfriamiento (o purga)	Azul
Modo llama (Flame)	Borde negro
Modo FLOX	Borde blanco
Modo Local	Texto "L"
Modo Manual	Texto "M"
Modo AUTO	Sin texto
Bloqueado	Amarillo

3.2.- ESTUDIO GENERAL DEL COMPORTAMIENTO

Durante el periodo de prácticas el principal objetivo era estudiar los problemas que iban surgiendo diariamente respecto al funcionamiento del horno, con el fin de analizar sus causas y poder proponer una solución que impidiera su repetición o que permitiera conocer dichos problemas con cierta antelación. En este apartado se resumen los problemas principales que han ido apareciendo.

3.2.1.- DIFERENCIA SIGNIFICATIVA ENTRE CONSIGNA Y MEDICIÓN DE TEMPERATURA

Este fue el principal problema que se observó aunque ya se conocía previamente puesto que era uno de los signos que indicaban que el horno no funcionaba como se esperaba. De forma resumida, se puede decir que, en algunas zonas, principalmente la 1, 3 y 5 existía una diferencia sustancial entre la temperatura consignada y la que realmente se medía a través de los termopares, llegando estas diferencias a alcanzar los 100°C.

Cabe mencionar que de forma natural, las zonas inferiores (números impares) tienden a sufrir una carga mayor que las superiores. Esto tiene su explicación en los fenómenos de transferencia de calor: radiación y convección. El horno transmite el calor mediante los tubos a las zonas por radiación; sin embargo, existe una transferencia de calor por convección de las zonas inferiores a las superiores, lo cual hace que las últimas se carguen menos que las primeras puesto que reciben por convección una parte del calor que generan. Inicialmente existía un método de regulación que aumentaba la carga de las zonas superiores para tratar de equilibrar las cargas de todas las zonas, no obstante, este método se desactivó y genera un problema leve en el funcionamiento que se analizará después.

Aun así, este hecho de la diferencia de cargas no explica por completo la gran diferencia entre temperaturas consignada y medida, lo cual se comprobó observando que en momentos de gran demanda de carga, ésta no llegaba al 100% en las zonas mencionadas

previamente. La explicación de esta circunstancia tenía otra causa diferente, un nivel insuficiente de depresión de humos que impedía la extracción de los gases de combustión cuando el caudal de humos aumentaba por un alto nivel de carga.

La solución a este problema de falta de depresión se comentará en el apartado de mejoras y está relacionada con la regulación de los ventiladores exhaustores que son quienes producen la depresión.

3.2.2.- FALLOS EN LA MEDIDA DE OXÍGENO

La medición del oxígeno en los colectores se realiza mediante sondas marca Land AMETEK y modelo Genesis WDG 1200, las cuales son aparatos caros, relativamente antiguos y proporcionan una medición bastante lenta, como ya se dijo en el apartado 3.1.1.4.- Esta lentitud en la medición provoca problemas en la corrección de oxígeno cuando baja del 4%, lo que se agrava cuando existe algún fallo en la regulación de la válvula de humos.

Estos fallos en las sondas han provocado el apagado de algunas zonas en repetidas ocasiones, ya que se produce cuando el porcentaje de oxígeno baja del 0,5%. La solución a este problema pasará por aumentar la eficacia en la medida de estas sondas mediante un nuevo modelo.

3.2.3.- FALLOS EN REGULACIÓN DE VÁLVULAS

Las válvulas de gas y humos reciben una señal eléctrica de consigna del sistema de control que debe transformarse en una apertura porcentual de la válvula de mariposa. Para ello existe un sistema de transformación de la medida de corriente en medida de presión, un transmisor de presión y un cilindro que regula la posición de la mariposa. Los fallos en

este actuador proceden de la falta de retroalimentación ya que no es posible conocer la posición exacta de apertura de la válvula. Esta carencia impide detectar de forma directa y temprana los posibles fallos en el posicionamiento de la válvula, los cuales acaban detectándose cuando se produce el apagado repetido de alguna zona, lo que está estrechamente relacionado con lo comentado en el apartado anterior de la medición de oxígeno.

La misma problemática sucede en las válvulas de gases, con la ligera diferencia de que éstas poseen caudalímetros que permiten conocer el caudal de gas de cada zona y compararlo con la consigna realizada, aunque la fiabilidad no es completa. Para solventar estos fallos se requerirá una medición eficaz de la posición real de la válvula que emita una alarma o aviso cuando detecte una anomalía frente a la consigna.

3.2.4.- FALLOS EN QUEMADORES

No existe un sistema fiable para la detección de quemadores apagados; el sistema actual detecta cuando no existe llama en el piloto del quemador, pero no en el quemador en sí. Este problema, aunque no habitual, tiene relativa importancia por varios motivos:

- Si el número de quemadores es menor que un valor fijado por zona se produce el apagado de la misma.
- Si existen quemadores apagados dentro del rango anterior y no se detectan, se producirá una sobrecarga de los quemadores encendidos y un derroche de energía en el calentamiento de aire (por los tubos con quemadores apagados circula aire que enfría la zona).
- Si un quemador posee una fisura o grieta, provocará serios problemas en la combustión. En primer lugar, hasta que se produzca la anulación de dicho quemador, la atmósfera del horno (mezcla HNx) se colará por el tubo y

disminuirá el nivel de oxígeno en su interior, ocasionando los problemas asociados a la presencia de una atmósfera reductora en el interior del tubo. Por otro lado, es preciso realizar adecuadamente el proceso de anulación del tubo realizando los siguientes pasos, puesto que su reemplazo puede demorarse en el tiempo:

1. Puesta en paro de la zona en cuestión y forzar la válvula de humos de dicha zona al 10% de apertura en vez del 40% al que se situaría si estuviera en automático, lo cual provocaría una gran succión indeseable.
2. Cerrar el suministro de gas al quemador y al piloto del tubo.
3. Desmontar el latiguillo del gas y poner tapones. A continuación, repetir el proceso con el latiguillo del aire.
4. Descalorifugar.
5. Tapar el orificio de entrada del aire exterior para no contaminar la atmósfera del horno a través de la grieta.
6. Colocar una brida ciega en la salida del tubo para evitar la fuga de la atmósfera del horno a través de los exhaustores. Calorifugar.
7. Protocolo de Mantenimiento Eléctrico. Se debe mantener el piloto del quemador activado para evitar que se corrija el porcentaje de oxígeno suponiendo, de forma errónea, que por el tubo solo circula aire. Además, se deberá incluir en el procedimiento la reducción del caudal de gas nominal de la zona correspondiente a la no disponibilidad de dicho tubo, acción que se incluiría en el procedimiento de anulación de tubos y que debería realizar Mantenimiento Eléctrico de forma manual mediante programación en el *software* de regulación.

8. Poner la válvula de humos en modo automático externo.

3.2.5.- FIABILIDAD DE LA MEDIDA DEL CAUDAL DE HUMOS

No existen sensores para la medida directa del caudal de humos, lo cual se realiza de forma indirecta mediante una forma experimental implantada por la empresa *Drever* (diseñadora del horno). Esta fórmula no es exacta y obliga a tener que emplear un alto rango en el nivel de oxígeno en humos. El valor del 4% obliga a calentar aire en exceso, ocasionando un gasto de energía mayor del necesario. Ese exceso de aire se podría reducir si la medición del caudal de humos fuera más fiable.

La medición de un caudal de gases de combustión es, en rasgos generales, complicada, debido a la propia heterogeneidad de la mezcla de los gases y a la incapacidad de obtener datos del proceso real de combustión. La combustión variable que se produce en los tubos de tipo W genera una gran incertidumbre sobre la composición química y las propiedades físicas de los gases de combustión. Estos hechos provocan grandes dificultades en la medición del caudal de dichos gases que se pueden resumir en dos aspectos:

- La variabilidad en la presión en el colector impide colocar un sensor tipo Tubo de Pitot para medir la velocidad de los humos, lo que indirectamente proporcionaría el caudal. Además, para instalar un Tubo de Pitot es preferible que el flujo sea laminar y se requiere una colocación bastante precisa sin alteraciones, lo que probablemente ocasionaría problemas en su mantenimiento [10].
- La variabilidad de la combustión dificulta en gran medida conocer la composición química de los gases de combustión, lo cual impide la instalación de un medidor de flujo másico, que requiere una calibración muy precisa.

- Existen algunos tipos de sensores como los sensores por ultrasonidos que producen una medición muy precisa pero presentan un coste bastante elevado y no se contempla realizar esta inversión [11, 12].

3.2.6.- FIABILIDAD DE LA MEDIDA DE LOS PIRÓMETROS

La medición de la temperatura de la banda en el conjunto del horno se lleva a cabo mediante pirómetros, existiendo 11 en funcionamiento según se puede ver en la Figura 3.13. Éstos no se han analizado en el apartado de sensores 3.1.1.1.- debido a que no pertenecen al nivel 1, pertenecen al nivel 2 o Modelo Matemático. La medición de temperatura a través de pirómetros posee varias ventajas significativas:

- Se realiza una medición de la temperatura del objeto sin contacto físico, midiendo directamente la energía electromagnética que emite y realizando una conversión.
- El pirómetro opera sin contaminar la atmósfera del horno ni interferir con la banda.
- Se puede montar a cierta distancia del foco caliente.
- El mantenimiento requerido es bajo.

Sin embargo, la principal desventaja de la medición con pirómetros radica en la transformación de la energía electromagnética en una medida efectiva de temperatura. En este punto es donde cobra gran importancia el cálculo de la emisividad del objeto a medir. Es necesario tener en cuenta además dónde se coloca el pirómetro y a qué parte de la banda está apuntando para la medición, y ligar esto con la emisividad. [13]

En el proceso de regulación y control que se está analizando hay tres pirómetros principales que influyen en el control del proceso, los cuales se detallan a continuación con su denominación según los planos:

- P3 *vir.* Ubicado en la salida de la zona de calentamiento. Determina la temperatura máxima del ciclo de recocido y sirve para definir las consignas de temperatura de las zonas.
- P4. Ubicado al final de la refrigeración lenta y antes de la refrigeración rápida. En el proceso de temple, define la temperatura objetivo al final del enfriamiento lento.
- P7. Está ubicado en la parte final de la refrigeración rápida y antes de la parte de igualación.
- P8 *bis.* Ubicado en la salida del horno, antes de la entrada en el pote. Determina la temperatura que debe presentar la banda para el proceso de recubrimiento.

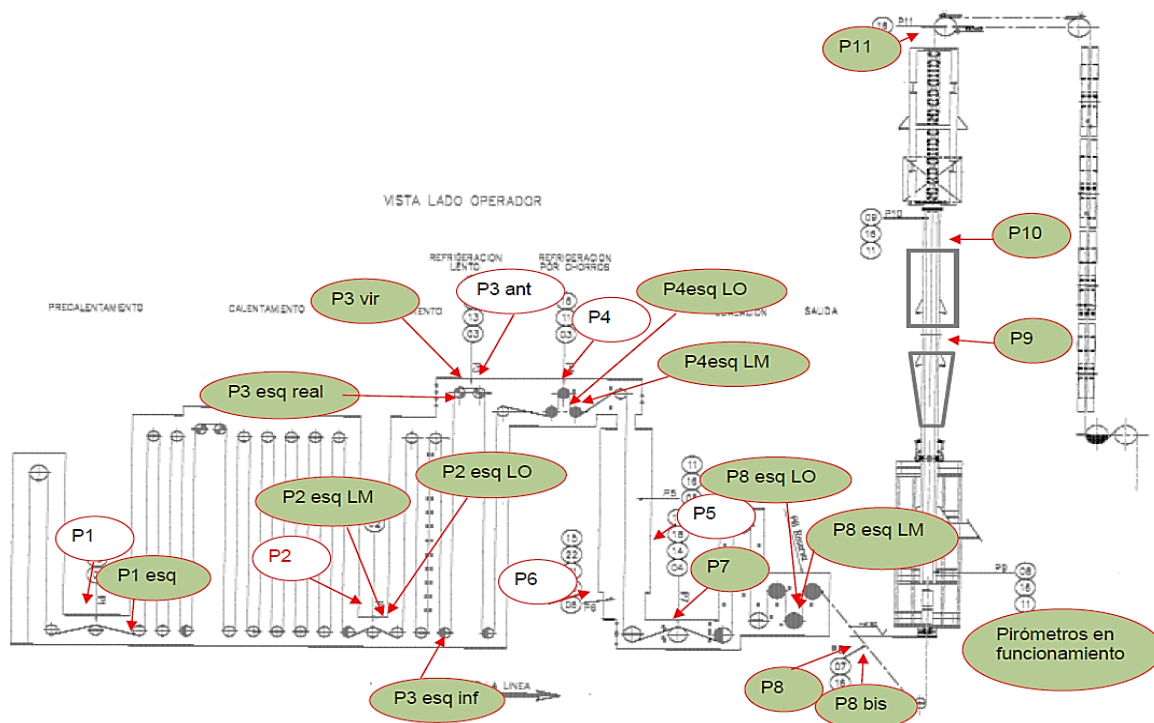


Figura 3.13. Esquema del horno con la colocación de los pirómetros.

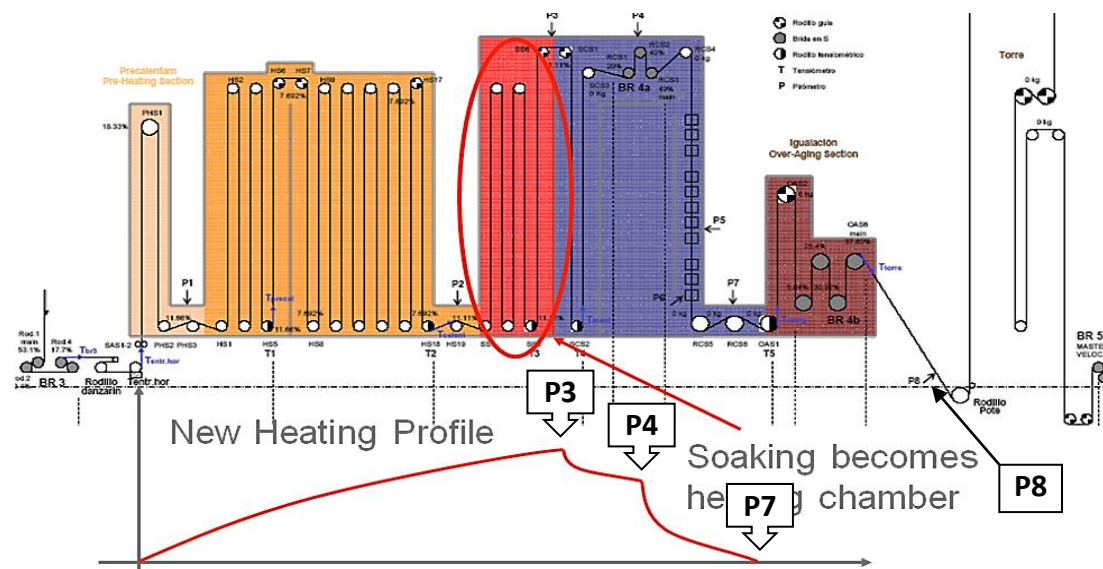


Figura 3.14. Esquema del ciclo de recocido que se realiza en el horno con los puntos de medición de los 4 pirómetros principales. (© ArcelorMittal)

De los 16 pirómetros que figuran en el esquema, 11 están en funcionamiento y únicamente 4 se emplean en la regulación (ver Figura 3.14). Existen pirómetros duplicados en algunas secciones del proceso como en el caso del P3, esto se hizo con el fin de comprobar su fiabilidad durante un periodo de pruebas. El objetivo final es emplear su medición en el control del horno y sustituir el actual *P3 vir* que mide la temperatura en la parte inferior de la zona y calcula la ganancia térmica hasta la salida, lo cual supondría una mejora en la precisión.

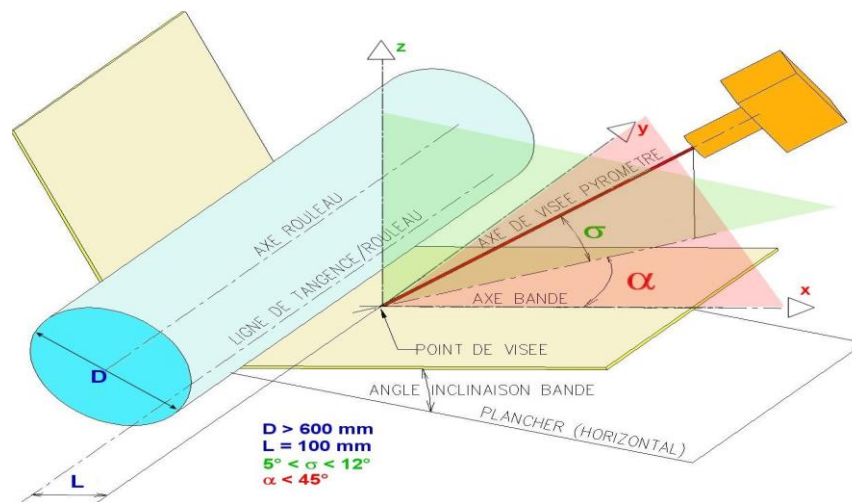


Figura 3.15. Esquema de medición pirométrica en esquina.

3.3.- ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO CON ACEROS DP

Como ya se ha comentado en la introducción, se debe afinar la regulación del horno cuando se procesan aceros DP en la línea. El ciclo de recocido requerido debe mantenerse en unos márgenes de ± 10 °C, por ello es necesario asegurarse que el sistema de control cumpla con las consignas exigidas. En este apartado se detallarán las particularidades de estos aceros y los problemas específicos que presentan durante el proceso de galvanizado.

3.3.1.- INTRODUCCIÓN A LOS ACEROS DP

Los aceros de Fase Doble (*Dual Phase* en inglés, de ahí viene su nombre) son una gama de aceros de alta resistencia con un nivel de carbono bajo – medio y que se obtienen mediante laminación en caliente. Estos aceros poseen un gran equilibrio entre resistencia y estampabilidad debido a su microestructura, compuesta por una fase dura (martensita o bainita) dispersa en una matriz ferrítica. Gracias a su elevado nivel de resistencia mecánica (sus valores de resistencia a la tracción oscilan entre 450 y 800 MPa) poseen una alta capacidad de absorción de energía y una buena resistencia a la fatiga, lo cual hace que sean destinados para el uso como piezas estructurales y de seguridad. Este tipo de piezas son claves en el sector del automóvil, ya sean largueros, llantas, travesaños o refuerzos (ver Figura 3.16). [14]

Dentro de la curva típica de clasificación de los aceros (resistencia a la tracción frente elongación) los aceros DP se encuentran en la zona central (ver Figura 3.17), en la frontera entre los aceros ultra resistentes (UHSS – *Ultra High Strength Steels*) y los de alta resistencia (HSS – *High Strength Steels*).

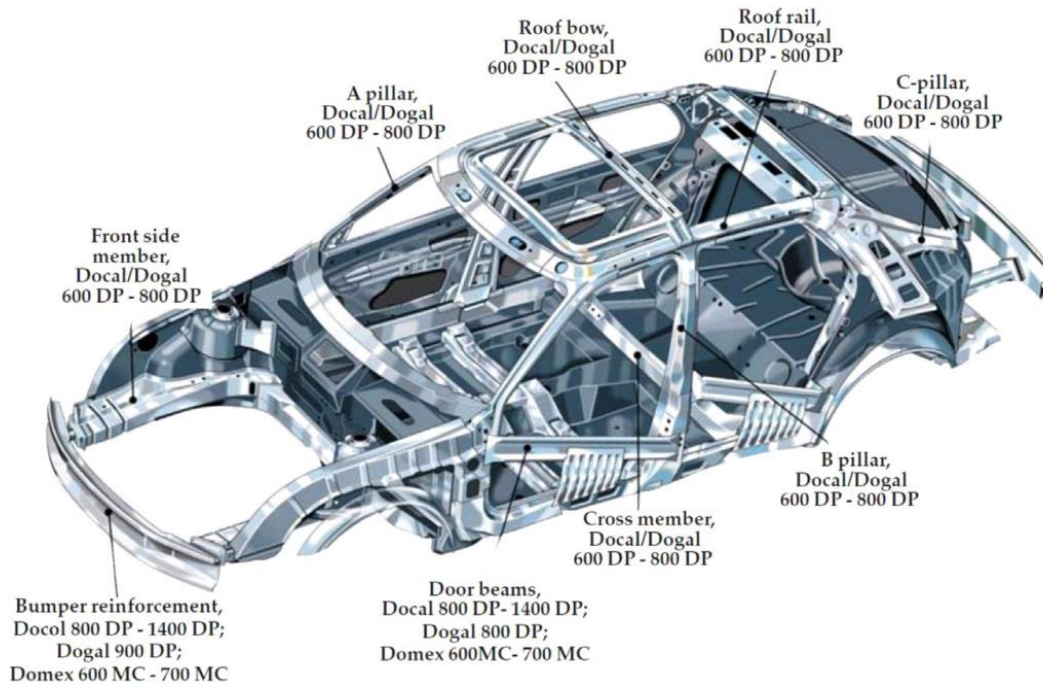


Figura 3.16. Ejemplo del uso de diferentes grados de Aceros DP en elementos de la carrocería de un automóvil del fabricante Saab. [15]

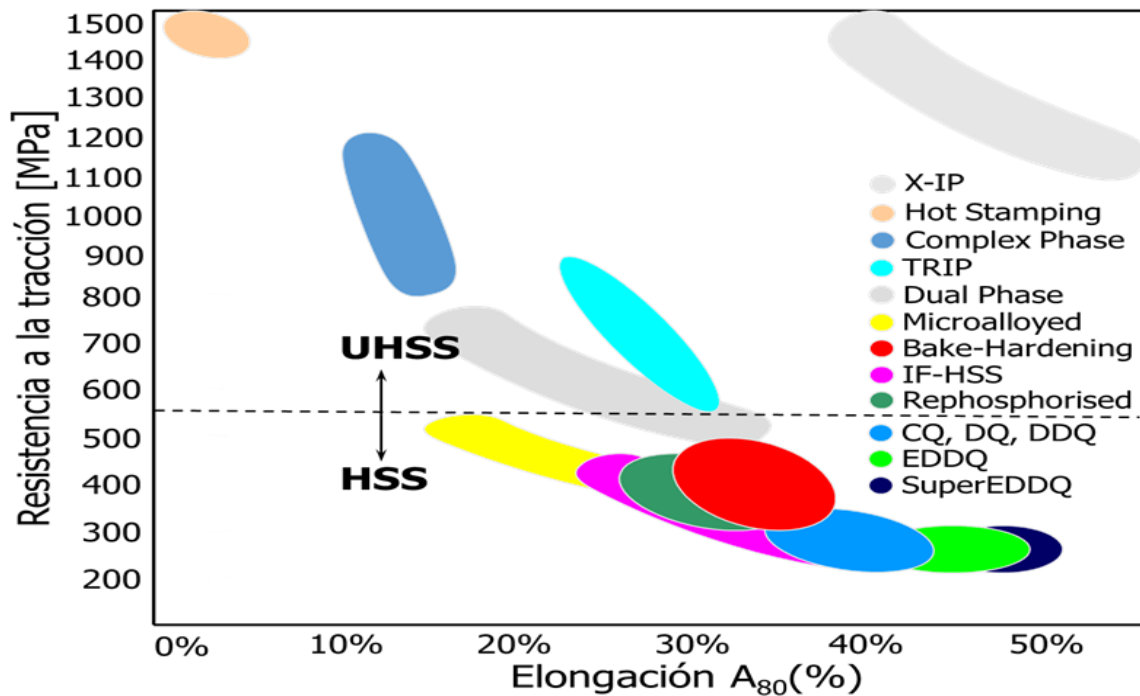


Figura 3.17. Diagrama de clasificación de familias de aceros según su resistencia y elongación o alargamiento. (© ArcelorMittal)

En los últimos años se ha producido una constante demanda por parte del sector del automóvil en emplear aceros más ligeros con el objetivo de reducir el consumo de combustible y la emisión de gases y partículas contaminantes manteniendo las propiedades mecánicas deseadas. Por ello, es necesario afinar aún más las propiedades de los aceros DP. Actualmente, estos aceros son los más utilizados en partes de vehículos. Sin embargo, debido a esa necesidad de mejora constante en las propiedades, la complejidad del proceso de fabricación aumenta, especialmente en la parte de recocido analizada en este proyecto.

La temperatura de calentamiento del ciclo de recocido es fundamental para el control de la formación de austenita y su estabilidad, lo que posteriormente influye en la formación del volumen de martensita durante el proceso de enfriamiento según se observa en la Figura 3.18. De forma resumida, esto da lugar a la necesidad de controlar de forma muy precisa las temperaturas y los tiempos del ciclo para garantizar la obtención de las propiedades mecánicas deseadas al final del proceso. [16] [17] [18]

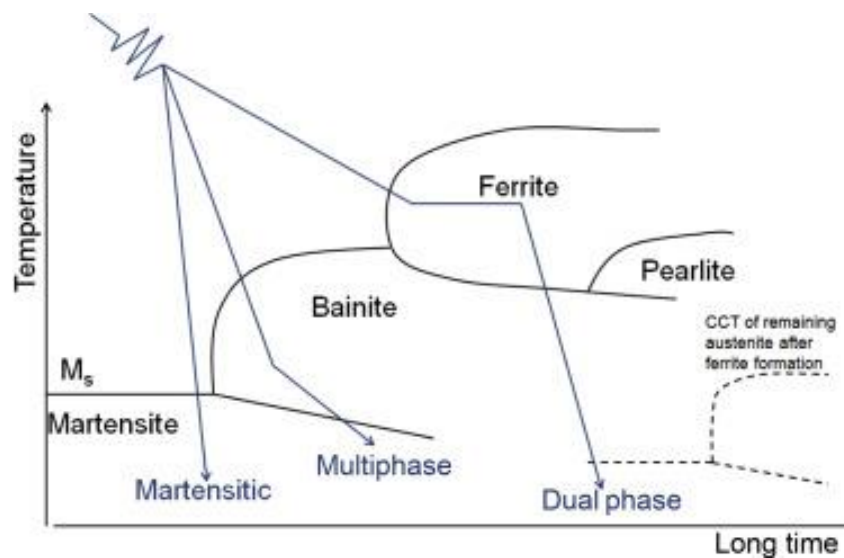


Figura 3.18. Esquema del proceso de laminación en caliente para aceros DP. [14]

3.3.2.- PROBLEMAS RELACIONADOS CON LOS ACEROS DP

En relación con lo comentado anteriormente, los fallos de regulación del horno son más evidentes cuando se lleva a cabo una campaña de fabricación de acero DP. Por sus particularidades estos aceros tienen un estricto control de la temperatura de recocido, para lo cual se establece una horquilla de $\pm 10^{\circ}\text{C}$ en torno a la consigna. Si la temperatura de banda medida al final de la zona de calentamiento del horno se sale de esta zona, se produce una retención de la bobina según un código de fallo asociado a este problema. El procedimiento posterior consiste en realizar, por parte del *Departamento de Ingenieros de Producto, Metalurgia y Calidad Frío y Recubiertos* un ensayo para comprobar el cumplimiento de las propiedades mecánicas deseadas en la bobina (de acuerdo a un procedimiento normalizado específico).

Según las observaciones realizadas por los ingenieros de producto, esta retención se producía de manera bastante habitual, lo que no implica necesariamente que existiera un rechazo excesivo de bobinas. Sin embargo, existían comportamientos anómalos en el horno que no se podían analizar en detalle debido al desconocimiento del funcionamiento de la regulación del horno que ya se ha mencionado. Un problema conocido y que se podía apreciar era el incumplimiento de las órdenes de consigna de temperatura por zonas (ver apartado 3.2.1.- DIFERENCIA SIGNIFICATIVA ENTRE CONSIGNA Y MEDICIÓN DE TEMPERATURA).

Aunque los problemas relativos al horno derivados de la fabricación de este tipo de aceros se deben a las mismas causas que los descritos de forma general en el apartado 3.2.-, cabe realizar una mención concreta sobre este tema puesto que estos aceros son los que presentan más dificultades de fabricación en lo respectivo a temperaturas. Por ello, se ha realizado un análisis en detalle, durante las campañas de fabricación de estos aceros, de las bobinas que tienen un fallo en la temperatura de recocido, con el fin de determinar la causa real del mismo.

4.- Análisis de mejoras

En este capítulo se pretende elaborar un estudio de utilidad sobre posibles acciones a llevar a cabo en la línea con el fin de solventar algunos de los ya citados problemas o, simplemente, mejorar el comportamiento del horno para aumentar el nivel de automatización y reducir las necesidades de control y supervisión manual, es decir, acciones ejecutadas por personas. Con el fin de facilitar la comprensión de estas acciones, se clasificarán en dos grupos: uno englobará las acciones destinadas a mejorar el sistema de regulación y control analizado y, el segundo, comprenderá aquellas medidas destinadas a automatizar el comportamiento dentro de un futuro sistema de alarmas a través del control estadístico de gráficas de proceso OSPC (*Online Statistical Process Control*).

4.1.- MEJORAS EN EL SISTEMA DE REGULACIÓN Y CONTROL

El sistema de regulación y control de nivel 1 presenta algunos inconvenientes, que se manifiestan en algunos de los problemas relatados en el apartado anterior. A continuación se va a incluir un listado de las mejoras concretas.

4.1.1.- CORRECCIÓN DE ERRORES DEL SISTEMA

En un primer acercamiento a la comprensión del funcionamiento del sistema, se detectó que había ciertos parámetros que no funcionaban según lo diseñado. Existen varios casos concretos.

4.1.1.1.- Depresión de los humos de combustión.

Uno de los motivos por los cuales la temperatura de las zonas estaba bastante de su consigna era por falta de potencia de calentamiento, lo cual estaba parcialmente relacionado con la falta de depresión de humos. Con el funcionamiento existente, ya

comentado, según el cual se produce la regulación del caudal de humos a través de la depresión en el colector de escape; dicha depresión es clave para asegurar un buen funcionamiento. Lo que se observó al principio es que, por falta de depresión en el escape, el caudal de gas quedaba limitado en un valor inferior al caudal nominal de gas de zona. La solución era relativamente sencilla, se necesitaba aumentar la potencia de los exhaustores de humos para aumentar la depresión en los colectores de gases de combustión.

4.1.1.2.- Limitación del caudal de gas máximo en zona 1.

Existía una limitación en la programación electrónica que reducía el caudal nominal de 452 a 400 Nm³/h disponible en la zona 1. Se desconocían los motivos de esta restricción pero afectaba a la capacidad de calentamiento del horno, lo cual cobraba mayor importancia al ser ésta la zona inicial del horno en la cual se requiere una mayor potencia de calentamiento.

4.1.1.3.- Mejora del funcionamiento de reguladores.

Con el fin de mejorar la respuesta de los reguladores estabilizando la salida, se ha establecido una banda muerta en la salida del Regulador de la Corrección de Oxígeno. Se implantó provisionalmente en las zonas 1 y 2 a modo de prueba para, posteriormente, trasladar esta modificación al resto de zonas. El objetivo era conseguir una salida de dicho regulador con menos oscilaciones, lo que indirectamente mejorará el control de oxígeno.

4.1.1.4.- Mejora de la corrección de oxígeno

Se introdujo un cambio en la programación de la corrección de oxígeno para aumentar la capacidad de corrección en el bloque de Regulación Cruzada. Según se indica en el apartado 3.1.3.2.-Regulación cruzada, el coeficiente corrector de oxígeno podía oscilar entre 1 y 1,15; con este cambio se aumentó hasta 1,25 en todas las zonas tras haber hecho el ensayo en las zonas 1 y 2. El objetivo de este aumento en la corrección es agilizar la

corrección anticipando la apertura de la válvula de humos cuando disminuya el nivel de oxígeno por debajo de la consigna.

4.1.1.5.- Mejora de avisos para el operador

Se plantea la posibilidad de mejorar el sistema de alarmas existente en el puesto de control del operario principal del proceso con el fin de garantizar la recepción del aviso y poder responder de forma más rápida que la actual. Para ello se pretende crear dos niveles de alarmas según lo indicado en el apartado 3.1.3.3.- Medidas de precaución.

- El primer nivel de alarma consistirá en avisar mediante una luz parpadeante en el tablero del operador cuando se produzca el apagado de la zona.
- El segundo indicará el denominado “fallo grave” de la zona con una luz fija.

4.1.2.- PROPUESTA DE MEJORA DEL SISTEMA DE REGULACIÓN

Con el fin de subsanar los fallos que actualmente posee el sistema respecto a la regulación del exceso de aire que se introduce en los tubos, se propone una modificación parcial del sistema de regulación y control para simplificarlo y hacer que genere una respuesta más rápida sin perder la seguridad que proporciona el sistema actual. Los cambios que implicaría este sistema se desglosan a continuación.

4.1.2.1.- Regulación directa de la válvula de humos

Este cambio implicaría una regulación directa de la apertura de la válvula de humos en función del nivel de oxígeno deseado en ellos. Se suprimirían los actuales sub-bloques selectores de máximo/mínimo y se transformaría el Regulador de Humos según muestra la Figura 4.1 para realizar la función descrita anteriormente, siendo:

- El SP del regulador sería el nivel de oxígeno deseado.
- El AV del regulador sería el nivel de oxígeno medido en el colector de humos.
- La salida del regulador es el porcentaje de apertura de la válvula de humos, la cual funcionaría según las siguientes pautas:
 - Si $AV > SP \rightarrow$ Cierre progresivo de la válvula.
 - Si $AV < SP \rightarrow$ Apertura progresiva de la válvula.

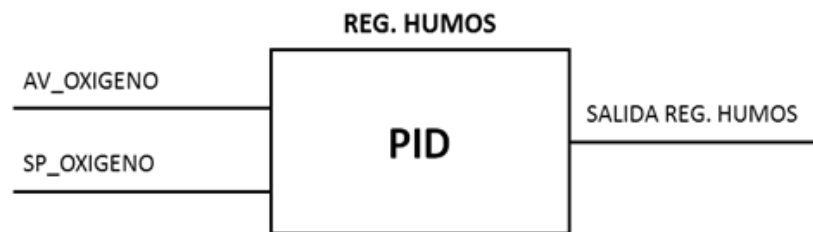


Figura 4.1. Esquema de la regulación de humos modificada.

La inclusión de esta mejora se podrá realizar cuando se complete el cambio de sensor de medida de oxígeno en todas las zonas, ya que se está cambiando progresivamente de un modelo antiguo que proporcionaba una respuesta muy lenta a un nuevo modelo de sensor con una medición más rápida, cuyo coste además es sustancialmente menor. Los detalles de ambos sensores se indican en el apartado 3.1.1.4.-

4.1.2.2.- Cambio en la regulación del caudal de gas

Para que sea factible el cambio anterior, se ha de modificar el funcionamiento del Regulador de Gas, el cual funcionaría directamente con la consigna de carga de la zona. Para asegurar que se cumplen los mismos objetivos que con el modo de funcionamiento anterior, es necesario incluir otros cambios cuyo resultado se ha plasmado en la Figura 4.2.

- La consigna de gas será el resultado directo de multiplicar la carga de cada zona por el caudal nominal de gas de cada una.

- Esta consigna de gas será corregida para asegurar que no se aumenta el caudal de gas cuando el nivel de oxígeno se encuentre por debajo de un valor prefijado. Esta consigna corregida será el SP del Regulador de Gas.
- El AV del Regulador de Gas seguirá siendo, como es lógico pensar, la medición del caudalímetro de gas de cada zona.
- Como medida adicional para garantizar que se cumple el nivel de oxígeno deseado en los humos, se limitará la apertura de la válvula de gas cuando el nivel de oxígeno descienda por debajo del SP establecido en la válvula de humos.

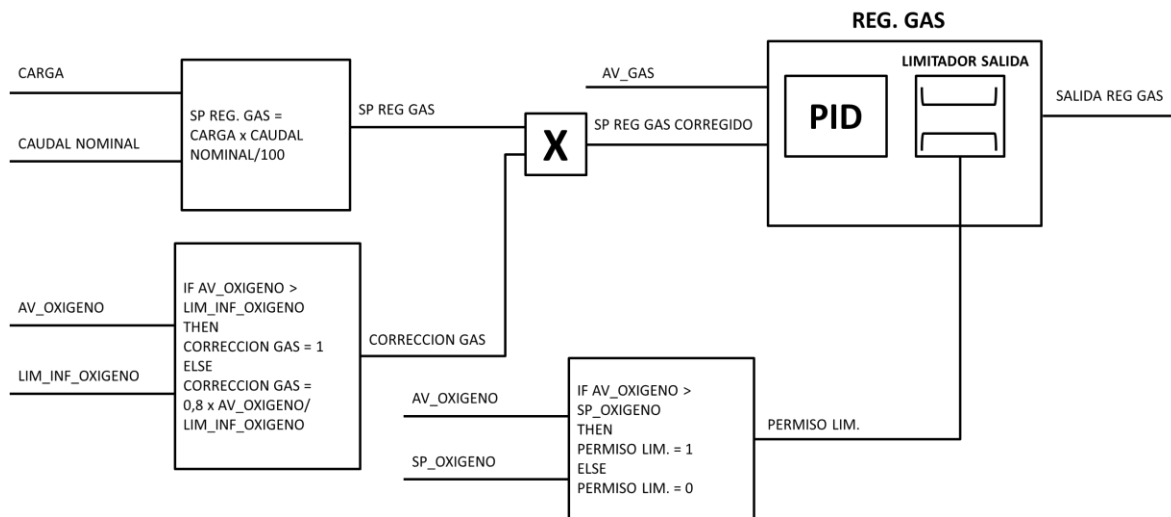


Figura 4.2. Esquema de la regulación de gas modificada.

Para aclarar, el hecho de sustituir la regulación cruzada entre válvulas de gas y humos que existía anteriormente implica la creación de dos nuevas condiciones para garantizar que el oxígeno no descienda de un valor límite fijado; lo lógico sería que este valor fuera ligeramente inferior al *SetPoint*, por ejemplo, si actualmente el SP es del 4%, el valor límite podría estar en torno al 3,5%.

4.1.3.- PROPUESTA DE MEJORA DEL MODELO MATEMÁTICO

Una vez realizada la corrección de errores que se ha comentado en el apartado 4.1.1.-como respuesta al problema descrito en el apartado 3.2.1.-, se observa que sigue habiendo diferencias significativas entre la consigna y la medición de la temperatura de zona en las zonas 1 y 3. Esta diferencia ha disminuido respecto a la situación inicial, pero sigue existiendo.

Para buscar el origen de este problema se consulta el listado de consignas que se envían desde el Modelo Matemático al nivel 1. Se observa que el reparto de consignas a cada zona se realiza de una forma un tanto aleatoria, esto se debe básicamente a dos motivos:

- No se produce una secuencia lógica en el reparto de consignas, tal y como se puede ver en la Figura 4.3. El orden de consignas debería ser ascendente a medida que la banda avanza en el horno, siguiendo la curva típica de un ciclo de recocido. La temperatura mínima sería para las zonas 1 y 2 y la máxima para las zonas 9 y 10.
- Cada zona recibe una consigna diferente, cuando cada par de zonas¹ debería recibir la misma consigna. La proposición de este cambio se debe a que la banda se mueve entre las zonas parejas en vertical, por lo tanto no tiene sentido someterla a subidas y bajadas de temperatura, si no que debería producirse el aumento gradual que se mencionó en el punto anterior.

¹ Como par de zonas o zonas parejas se refiere al bloque formado por una zona inferior y la que se encuentra encima, los pares que hay son las zonas 1 y 2, 3 y 4, 5 y 6, 7 y 8; y 9 y 10. Ver Figura 3 del Anexo 1 donde se muestran todas las zonas del horno.

Para poder llevar a cabo la implantación de dicho modelo se necesita cumplir varias condiciones en cuanto a estrategias de actuación, instalación de nuevos equipos y desarrollo de la programación requerida en el ordenador de proceso para OSPC.

4.2.1.- ESTRATEGIA DE ACTUACIÓN

La primera parte del proceso consiste en definir una estrategia concreta que permita detectar el origen de los fallos que se observen. Se desarrollará un algoritmo relativamente sencillo que permitirá identificar la raíz del problema, ya sea un equipo o varios que están funcionando de forma incorrecta, un fallo de comunicación, una decisión humana errónea, etc.

El inicio del diagrama, que indicará la existencia de un error, comenzará con una desviación sustancial en la consigna de la temperatura máxima del ciclo de recocido, es decir, la que se le envía al pirómetro P3 situado a la salida de la zona de calentamiento del horno. Una vez detectado el error, el objetivo final será distinguir si el origen del fallo se encuentra en el nivel 1 o en el nivel 2. Si la raíz del problema está en el nivel 1, se revisará el comportamiento de los principales actuadores y sensores (válvulas de humo, válvulas de gas, quemadores y sondas de oxígeno principalmente) para averiguar qué elemento concreto está fallando y poder actuar sobre él. También se podrán detectar fallos en la actuación de los operadores de la línea para tratar de subsanarlos en el futuro. Por otra parte, si el origen está en el nivel 2 o Modelo Matemático, se comunicará al departamento responsable, Informática de Procesos, de los casos más llamativos para que realicen las correcciones oportunas. En este punto del proceso sería conveniente, aunque sería una acción a más largo plazo, el desarrollo de una herramienta de recopilación de datos para su posterior análisis. El fin de esta herramienta sería almacenar una serie de datos concretos de cada bobina con un fallo asociado al nivel 2; esto permitiría implementar posteriormente cambios en la programación del *software* que rige el Modelo Matemático, cambios en la programación de bobinas de la línea, modificaciones de las pautas de operación, etc.

El resultado del proceso descrito se ha plasmado como diagrama de flujo en la Figura 4.4. Cabe mencionar que este esquema solo abarca una parte de las posibilidades que permite el sistema OSPC. El uso de esta herramienta se ha enfocado exclusivamente al control de la zona de calentamiento y su uso podría extenderse al control de la parte de refrigeración del horno – lenta y rápida –, así como para mejorar la fiabilidad de medida de pirómetros o termopares que se encuentran duplicados.

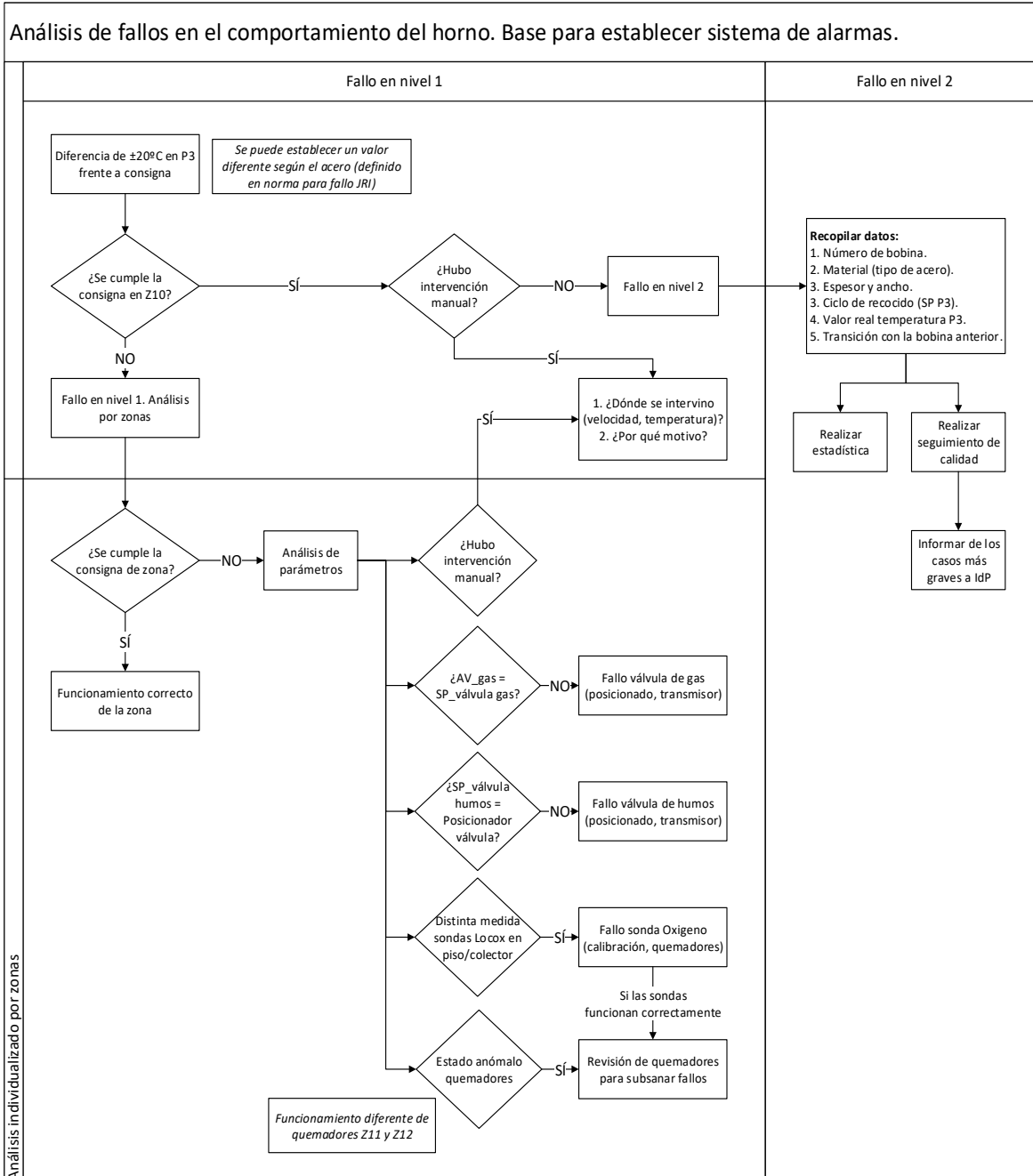


Figura 4.4. Esquema básico del diagrama de detección de fallos (se incluye en el Anexo 4 para facilitar la visualización).

4.2.2.- NECESIDADES DE EQUIPOS

Con los actuales equipos no es posible realizar el proceso de detección de fallos de forma automática, para ello sería necesario lo siguiente:

- Instalación de detectores de posición en las válvulas de humos y gas
- Realizar el cambio de sondas de oxígeno a las del tipo “Locox”, más rápidas y fiables, para todas las zonas.
- Instalar una sonda de oxígeno por cada piso de zona del horno, lo cual ahora es factible económicamente gracias a la reducción del coste de las sondas “Locox”. Con este cambio se podrán detectar fallos en los quemadores o problemas en la combustión de una forma más rápida, ya que se restringe el área de fallo considerablemente al pasar de una zona a un grupo de 3 a 6 quemadores.

4.2.3.- IMPLANTACIÓN DE OSPC

La estrategia de implantación del análisis mediante OSPC se debería realizar en dos etapas.

- En una primera fase se incluiría la monitorización de todas las variables que se deseen supervisar. Aquí se incluirían los siguientes avisos que debería recibir Producción a través de los jefes de turno, Mantenimiento Eléctrico y el Equipo de Combustión:
 - Diferencia considerable (a partir de > 10 °C según el tipo de acero) entre la medición y la consigna de los pirómetros. Aviso al Equipo de Combustión y/o Equipo Técnico de Galvanizado.

- Diferencia considerable ($> 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) entre la medición y la consigna de los termopares de zona. Aviso al Equipo de Combustión y/o Equipo Técnico de Galvanizado.
- Diferencia considerable ($> 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) en la medición de los dos termopares de zona, tubos y humos que existen duplicados en las zonas del horno. Aviso a Mantenimiento Eléctrico para revisión o recambio de termopares defectuosos.
- Diferencia entre la consigna de apertura de las válvulas de humos y gas frente al valor medido por los posicionadores que se van a colocar. Aviso a Mantenimiento Eléctrico para subsanar errores en las válvulas.
- Diferencia sustancial ($> 0,3\%$) entre la medida que proporcionan cada par de sondas de oxígeno instaladas por colector. Aviso a Mantenimiento Eléctrico para subsanar fallos en las sondas de oxígeno.
- Diferencia sustancial entre el porcentaje de oxígeno medido en el colector de humos y las mediciones de oxígeno realizadas por piso. La existencia de una desviación en la medida de oxígeno de un piso indicaría un posible fallo en un quemador de ese piso. Actualmente sólo se podría realizar esta comprobación en la zona 2. Se generará un aviso a Mantenimiento Eléctrico para subsanar fallos en las sondas de oxígeno o en los quemadores.
- Aviso de la existencia de quemadores cerrados en las Zonas de 1 a 10 y no disponibles en las Zonas 11 y 12. Se generará un aviso a Producción y a Mantenimiento Eléctrico.
- La segunda fase de implantación consistiría en el desarrollo y programación del algoritmo que se ha detallado anteriormente y que se muestra en la Figura 4.4 para automatizar la detección de fallos durante el ciclo de recocado en el horno.

5.- Conclusiones y trabajos futuros

5.1.- CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se ha estudiado en profundidad el funcionamiento del horno de recocido perteneciente a la Línea de Galvanizado Nº2 de ArcelorMittal Asturias con el fin de comprender el funcionamiento del sistema de regulación y control del mismo, poder detectar los fallos de funcionamiento más relevantes y proponer mejoras y cambios que permitan subsanar dichos fallos o reducir su grado de afectación en el proceso.

El primer capítulo se ha centrado en describir el proceso de galvanización del acero dentro de las diferentes técnicas de recubrimiento que lo protegen de los fenómenos atmosféricos, principalmente la corrosión y la oxidación. También se ha explicado la disposición y composición de los equipos presentes en una línea de galvanizado en caliente típica, con el fin de mostrar cuál es el papel que desarrolla el horno de recocido.

En segundo lugar se ha realizado una descripción detallada del sistema de regulación y control básico (nivel 1) de la sección de calentamiento del horno. Se ha efectuado una descripción técnica de los elementos de regulación implicados (sensores y actuadores), mostrando su papel en la regulación y los modelos empleados en la actualidad. Se ha incluido además un desglose de la programación electrónica que regula las relaciones entre los elementos de control y que define el funcionamiento del horno en coordinación con las órdenes que recibe del ordenador de proceso (nivel 2).

El siguiente paso ha consistido en examinar el comportamiento del horno en su funcionamiento regular con el propósito de detectar errores que provoquen fallos de calidad en las bobinas que procesa la línea. Algunos de estos problemas ya eran conocidos de forma general, como los relacionados con la fabricación de aceros *Dual Phase*, sin

embargo no se conocía en algunos casos el origen concreto de dichos fallos. Para ello se ha procedido a monitorizar en una primera fase los parámetros involucrados en el sistema de regulación dentro del programa de análisis y evaluación de variables existente. Con ello se ha podido profundizar en una siguiente fase en el conocimiento del sistema de control y en la detección de las causas raíces de los fallos.

La última parte del trabajo ha consistido en sugerir mejoras en el conjunto del sistema básico de regulación, así como en el nivel del ordenador de proceso, las cuales se han transmitido al departamento que lo gestiona. Las mejoras se han orientado en dos direcciones principales. Por un lado se han planteado cambios en el funcionamiento del sistema de control para subsanar errores o mejorar la eficiencia del proceso. Una parte se ha podido implantar mediante modificaciones directas realizadas por el equipo de mantenimiento eléctrico, mientras que otros cambios requieren un desarrollo más largo y deben completarse mediante trabajos posteriores. La otra dirección de mejora es el aumento de la automatización de la línea. Esto se pretende atajar implantando un sistema de alarmas que, por un lado, monitorice variables principales del proceso, avisando cuando existan desviaciones significativas respecto al comportamiento esperado; y, por otro lado, detecte posibles errores en elementos físicos del sistema.

Todo lo aquí expuesto está sujeto a discusión por las partes implicadas, las cuales pueden plantear en un futuro las modificaciones o sugerencias que consideren oportunas con respecto a su ámbito de responsabilidad.

5.2.- TRABAJOS FUTUROS

El desarrollo de la mayoría de las mejoras propuestas está en una fase inicial, lo que implica que se requerirán trabajos futuros para completarlas. Cabe mencionar de manera especial la mejora descrita en el apartado 4.1.2.-, la cual supondría un aumento sustancial de la eficiencia de la línea, traduciéndose en un ahorro económico por la reducción de los costes energéticos del horno.

Haciendo un breve desarrollo del Capítulo 4.- en lo que respecta a las propuestas, se pueden contemplar tres líneas de trabajo generales:

- **Incremento de la eficiencia y efectividad del sistema de regulación.** Se proponen dos modificaciones en el apartado 4.1.2.-PROPUESTA DE MEJORA DEL SISTEMA DE REGULACIÓN en cuanto a la programación que supondrían un cambio importante en el funcionamiento del sistema. El cometido del posterior trabajo sería la realización de los cambios indicados en el sistema de control en lo que respecta a la programación de los reguladores. El siguiente paso sería realizar varias pruebas de funcionamiento tras las modificaciones realizadas para comprobar que el sistema funciona según lo esperado, es decir, manteniendo la misma función, se obtiene una respuesta más rápida de las válvulas y se reduce el consumo energético al disminuir el caudal de aire introducido que luego se calienta durante la combustión.
- **Automatización de los trabajos de mantenimiento del horno.** El propósito de este proyecto sería continuar con los trabajos iniciados en ese sentido según se indica en el apartado 4.2.-. Ya se ha confeccionado un listado de variables relevantes que se desean monitorizar en el programa OSPC y se ha comenzado con la programación de las consiguientes alarmas. En cuanto a las necesidades de equipos, se ha validado la incorporación progresiva de los detectores de posición de las válvulas de humos y la sustitución de las sondas

de oxígeno por el nuevo modelo. Restaría en este caso validar la colocación de nuevas sondas en lugares estratégicos para aumentar el grado de control y realizar la programación correspondiente de las alarmas asociadas.

- **Desarrollo del sistema de detección de fallos.** Una vez concluido el trabajo anterior relativo a la supervisión automática de equipos del sistema, sería factible la programación de un método de localización de las causas de los fallos en el proceso de recocido. En la Figura 4.4 se muestra un esbozo inicial donde se muestra una estrategia posible a seguir con este fin, basada en las observaciones realizadas. Este trabajo posee unos fines más ambiciosos, ya que incluso plantearía la realización de una estadística sobre las bobinas que acumulen los fallos con el objeto de mostrar las relaciones existentes entre aquellas que causen más fallos.
- **Revisión de las propuestas relacionadas con el Modelo Matemático.** Se debe realizar un análisis en profundidad por parte del Departamento de Informática de Procesos sobre las aportaciones aquí realizadas sobre el comportamiento del Modelo Matemático. Esta parte ya ha sido iniciada, pero, dada la complejidad del mismo, requerirá cierto tiempo, recursos y una continua colaboración con el Departamento de Galvanizado.

6.- Bibliografía

- [1] Equipo Técnico del Centro de Formación Arcelor Mittal Asturias (La Toba), El Proceso Siderúrgico, 2007.
- [2] © WS Wärmeprozessechnik GmbH, «flox.com,» [En línea]. Available: <https://flox.com/en/prod/REKUMAT.html>. [Último acceso: 18 abril 2019].
- [3] A. Milani and J. G. Wüning, *New Regenerative Burner for Flameless Oxidation in Radiant*, Associazione Sezione Italiana del Combustion Institute, 2009.
- [4] J. G. Wuenning, “Flameless Oxidation in gas fired radiant tubes,” in *7th High Temperature Air Combustion and Gasification International Symposium*, Phuket, Thailand , 2008.
- [5] Ametek Land, «Ametek Land Products. WDG 1200&1210,» [En línea]. Available: <https://www.ametek-land.com/products/combustionefficiencymonitors/wdg12001210>. [Último acceso: 15 abril 2019].
- [6] Robert Bosch GmbH. Automotive Aftermarket, «Bosch Automotive Catalog. Bosch Lambda sensors,» [En línea]. Available: https://www.bosch-automotive-catalog.com/en_GB/product-detail/-/product/0258017025. [Último acceso: 10 abril 2019].
- [7] Baker Hughes, a GE Company, «Baker Hughes Rotary Control Valves. Masoneilan 35002 Series Camflex™ Rotary Control Valve,» [En línea]. Available: <https://valves.bhge.com/masoneilan/rotary-control-valves-masoneilan/masoneilan-35002-series-camflexm-rotary-control-valve>. [Último acceso: 12 abril 2019].

- [8] Bloom Engineering Company, Inc., «bloomeng.com. Recuperative Radiant Tube Burner Catalogue,» [En línea]. Available: https://www.bloomeng.com/uploads/pdf_files/RTB.pdf. [Último acceso: 29 abril 2019].
- [9] DREVER INTERNATIONAL S.A., «J450 – ACERALIA CGL. Aumento de la capacidad de la línea de galvanizado. Sistema de control del horno. Sección 13 - Descripción Funcional,» 2007.
- [10] OMEGA Engineering, «omega.co.uk - Introduction to Pitot tubes and probes,» [En línea]. Available: <https://www.omega.co.uk/literature/transactions/volume4/pitot-tube.html#learn>. [Último acceso: 17 abril 2019].
- [11] B. Steinberg, “Combustion Efficiency and Thermal Mass Flow Meters,” SAGE METERING INC., 2012.
- [12] SAMSON AKTIENGESELLSCHAFT, «Samson. Catálogo de productos de medida de caudal 2018,» enero 2018. [En línea]. Available: <https://www.samson.de/document/k00200es.pdf>. [Último acceso: 22 abril 2019].
- [13] Optris infrared thermometers, «optris.global - BASIC PRINCIPLES of Non-Contact Temperature Measurement,» [En línea]. Available: <http://infrarougekelvin.com/wp-content/uploads/2016/06/4A-IR-Basics-2.pdf>. [Último acceso: 17 04 2019].
- [14] N. Fonstein, Automotive Steels. Design, Metallurgy, Processing and Applications. Chap. 7, Dual Phase Steels, R. Rana and S. B. Singh, Eds., 2017.
- [15] K. Olsson, M. Gladh, J. Hedin y J. Larsson, «Microalloyed high-strength,» *Advanced Materials and Processes*, vol. 164, nº 8, pp. 44-46, 2006.
- [16] O. Girina, N. Fonstein y D. Bhattacharya, *Effect of Annealing Parameters on Austenite Decomposition in a Continuously Annealed Dual-Phase Steel*, 2003.

- [17] ArcelorMittal Global Automotive & Mobility Solutions, «ArcelorMittal Automotive. Dual Phase Steels,» [En línea]. Available: <https://automotive.arcelormittal.com/europe/products/AHSS/DP/EN>. [Último acceso: 17 abril 2019].
- [18] American Iron and Steel Institute, UltraLight Steel Auto Body Final Report, Washington, D.C., 1998.
- [19] United States Steel, The Making, Shaping and Treating of Steel, 10ª ed., 1984.
- [20] Equipo Técnico de Galvanizado, *Documentación técnica y presentaciones*, ArcelorMittal Asturias. Departamento de Recubiertos.
- [21] SMS Group, «SMS Group. Furnace Technology. Product Portfolio, Technology & References.,» abril 2017. [En línea]. Available: <https://www.sms-group.com/press-media/downloads/download-detail/22736/>. [Último acceso: 17 abril 2019].

7.- Anexos

Se entregan adjuntos al presente documento de Memoria los siguientes documentos:

- ANEXO 1. Planos generales.
- ANEXO 2. Esquema del bloque de Regulación Cruzada del sistema de control.
- ANEXO 3. Esquema de los bloques de gas, humos, temperatura y oxígeno del sistema de control.
- ANEXO 4. Diagrama de flujo para el análisis de fallos en el comportamiento del horno.

NOTA: Todos los planos que se incluyen en los Anexos son Propiedad Industrial de ArcelorMittal.