1999
116

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

DEPARTAMENTO DE EXPLOTACIÓN Y PROSPECCIÓN DE MINAS

TESIS DOCTORAL

MODELO DE CONTROL INTELIGENTE DE ESPESOR DE RECUBRIMIENTO EN GALVANIZADO CONTINUO POR INMERSIÓN

DIRECTORES:

Dr. Francisco Ortega Fernández

Dr. César Menéndez Fernández

AUTOR:

D. Eliseo Pablo Vergara González

SEPTIEMBRE 1999

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Índice de Materias

INTRODUCCIÓN **1**

1 DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO INDUSTRIAL **5**

1.1 PLANTEAMIENTO 6
1.2 EVOLUCIÓN DEL PROCESO DE RECUBRIMIENTO POR ZINC 7
1.2.1 Sistemas de Control de Recubrimiento *8*
1.2.2 Problemas del Proceso de Galvanizado en Continuo *13*
1.3 DESCRIPCIÓN DE LA LÍNEA 14
1.3.1 Sección de Entrada *16*
1.3.2 Sección de Proceso *16*
1.3.3 Sección de Salida *23*
1.4 SISTEMA DE CONTROL DE RECUBRIMIENTO 25
1.4.1 Cuchillas y Pantógrafos *27*
1.5 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL RECUBRIMIENTO 34
1.5.1 Distancia de las Cuchillas a la Banda *35*
1.5.2 Altura de las cuchillas con respecto al pote *35*
1.5.3 Velocidad de la banda *35*
1.5.4 Presión de Aire *35*
1.5.5 Ángulo de las cuchillas *36*
1.5.6 Geometría de los Labios de las Cuchillas *36*
1.5.7 Forma de la Banda *36*
1.5.8 Alineación de las Cuchillas con la Banda *36*
1.6 CONCLUSIONES 37

2 ESTADO DE LA TÉCNICA **39**

2.1 INTRODUCCIÓN 40
2.2 MODELOS DE ANALÍTICOS DE RECUBRIMIENTO 40
2.2.1 Modelo Analítico de Thornton *43*
2.2.2 Limitaciones del Modelo *59*
2.3 OTRAS APROXIMACIONES 62
2.3.1 Modelo de Malmedier *62*
2.3.2 Modelo de Lloyd Jones *62*
2.3.3 Modelo de Szekely *63*
2.3.4 Modelos de Elementos Finitos *66*
2.3.5 Métodos Multifase (VOF) *68*
2.4 MODELADO AVANZADO 70
2.4.1 Aplicación de Técnicas Inteligentes de Modelado a la Industria del Acero. *70*
2.4.2 Modelo para un Tren de Laminación de Chapa *73*
2.4.3 Modelo del Espesor de recubrimiento de Estaño para una Línea de Hojalata *75*
2.5 CONCLUSIONES 77

3 TÉCNICAS EMPLEADAS **79**

3.1 INTRODUCCIÓN 80
3.2 MÉTODOS DE SELECCIÓN DE VARIABLES 80
3.2.1 Algoritmo Univariante *81*
3.2.2 Algoritmo del Análisis de la Covarianza Múltiple *84*
3.2.3 Algoritmo Mínimo Error *86*
3.2.4 Splines Regresivos Multivariantes Adaptativos – (MARS) *87*
3.3 MÉTODOS DE PROYECCIÓN 90
3.3.1 Generalidades *90*
3.3.2 Proyección de Sammon *92*
3.4 REDES NEURONALES 94

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

3.4.1 Introducción a la Computación Neuronal *94*
3.4.2 Ventajas del Uso de Redes Neuronales *96*
3.4.3 Evolución Histórica *97*
3.4.4 Modelos de Redes Neuronales *99*
3.4.5 Evaluación de la Utilización Práctica de las Redes Neuronales *103*
3.5 CONCLUSIONES 106

4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS 108
4.1 INTRODUCCIÓN 108
4.2 MODELO ANALÍTICO 108
4.2.1 Hipótesis de Trabajo *109*
4.2.2 Ecuaciones del Sistema *109*
4.2.3 Definición del Dominio *111*
4.2.4 Condiciones de Frontera *111*
4.2.5 Formulación Débil del Problema *115*
4.2.6 Simplificación de las Ecuaciones *120*
4.3 MODELO NEURONAL 122
4.3.1 Planteamiento *122*
4.3.2 Determinación del Espacio de Búsqueda *125*
4.3.3 Empleo de Redes Neuronales *180*
4.3.4 Desarrollo de las Simulaciones *185*
4.4 CONCLUSIONES 186

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE FUTURO 188

6 REFERENCIAS 190

ANEXO I: TABLAS DE CORRELACIÓN

ANEXO II: LISTADO DE LOS RESULTADOS DE LOS ALGORITMOS DE SELECCIÓN

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Índice de Símbolos

ρ	Densidad del fluido de recubrimiento (kg/m^3)
$\bar{v}$	Velocidad (m/s)
t	Tiempo (s).
p	Presión (N/m^2)
μ	Viscosidad del fluido de recubrimiento (Kg/m.s).
$\bar{f}$	Fuerzas exteriores que actúa sobre el fluido.
Φ_v	Función de disipación de Rayleigh. Disipación viscosa de energía po unidad de tiempo, de volumen y de masa.
R	Constante de Boltzman ($0.082\ {}^{N.m}/_{Kg.K}$)
T	Temperatura absoluta (K)
δ_3	Recubrimiento en la zona
δ_4	Recubrimiento en la zona
U	Velocidad de la banda (m/s).
x	Coordenada vertical, con sentido positivo hacia arriba.
y	Coordenada horizontal, con sentido positivo en la dirección banda-cuchilla.
Q_0	Flujo volumétrico del líquido de recubrimiento por unidad de ancho d banda, ya solidificado (m^2/s).
$u(x,y)$	Velocidad del fluido de recubrimiento en la dirección paralela a la superfici de la banda, para un observador situado en el exterior (m/s).
e	Espesor del recubrimiento solidificado (m).
δ	Espesor del recubrimiento aún líquido (m).
e_0	Espesor del recubrimiento solidificado, pero en ausencia de chorro acabado (m).
p	Presión de soplado (N/m^2).
W	Velocidad del fluido dentro del chorro acabador (m/s).
W_0	Velocidad del chorro a la salida de la cuchilla (m/s).
d	Apertura de los labios de la cuchilla (m)
z	Coordenada auxiliar según el eje del chorro.
h	Coordenada auxiliar, perpendicular al eje del chorro.
σ	Constante relativa al grado de turbulencia en el chorro.
ρ_F	Densidad del fluido (aire) acabador (kg/m^3).
z_0	Distancia cuchilla-banda (m).
β	Constante relativa al impacto del chorro en la superficie.
γ	Relación entre los calores específicos a presión constante y a volume constante (1,4)
P_A	Presión atmosférica a nivel del mar.
η	Rendimiento.
H	Curvatura media gaussiana
σ_S	Tensión superficial.
q	Peso del recubrimiento (g/m^2).
N_{Ca}	Número capilar.
H_c	Profundidad de la depresión (m).
H_0	Distancia de la boquilla al líquido (m).
P_j	Cantidad de movimiento del chorro.
ρ_l	Densidad del líquido (Kg/m^3)

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

u_n	Componente normal de la velocidad.
f_n, f_t	Componentes normales y tangenciales respectivamente del vector d tensiones en la superficie.
p_0	Presión exterior.
α_1	Fracción de volumen de la primera fase (VOF).
α_q	Fracción de Volumen de la segunda fase (VOF).
μ_k	Media.
σ_k	Desviación Típica.
ω_i	Clase i-ésima.
$dis_i(x)$	Distancia probabilística.
c	Número de clases.
N	Número total de muestras.
N_k	Número de muestras en la clase k.
P	Número de variables de control.
q	Número de todas las variables predictoras
$\bar{x}_{k_i} = (x_{1,k_i},...,x_{p,k_i},x_{q,k_i})$	k_i muestra de la clase k que consiste en p variables seleccionadas y variables de control.
$\bar{\mu}_k$	Centroide local para la clase k.
$\bar{\mu}$	Centroide global para todas las clases.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Introducción

Hoy en día, la política comercial de las grandes empresas siderúrgicas está dirigida hacia la venta de productos de mayor valor añadido, como son los aceros recubiertos, fundamentalmente electrocincado y galvanizado, que están experimentando una creciente demanda en sectores tales como la automoción, electrodomésticos y construcción.

El recubrimiento galvanizado es un método de protección contra la corrosión, que consiste en la disposición de moléculas de metal protector sobre el material a proteger. Este metal protector acostumbra a ser el zinc por sus excelentes, y muy características ante la corrosión, acompañado en menor medida de aleantes para mejorar las propiedades de adherencia.

Debido a los distintos potenciales eléctricos del hierro y el zinc, cuando están en presencia de un electrolito, el zinc tiende a corroerse antes que el hierro formando óxidos y carbonatos de zinc muy estables y adherentes que impiden la corrosión continua del zinc, protegiendo al mismo zinc y por supuesto al acero base. Por esta particularidad del zinc frente al hierro, si a causa de un golpe cortante llegara a quedar al descubierto el acero base, será siempre el zinc el que empezará a corroerse, y al mismo tiempo, como los productos de la oxidación del zinc son muy compactos, si la zona descubierta no es muy grande, pueden llegar a recubrirla formando una nueva barrera frente a la corrosión.

Los recubrimientos galvanizados puede obtenerse, entre otros métodos, por inmersión de una banda continua en un baño conteniendo el metal de recubrimiento en estado líquido; es el llamado proceso de galvanizado en caliente continuo.

Actualmente es posible encontrar en las empresas siderúrgicas modelos para líneas de galvanizado, los cuales permiten calcular el recubrimiento que se va a obtener dados los parámetros de funcionamiento (velocidades, temperaturas, presiones, etc.) de la línea considerada. Ante la cada vez mayor exigencia de calidad por parte de los clientes, la exactitud de estos modelos es insuficiente, por lo que las industrias siderúrgicas se ven obligadas a recurrir a métodos de control puramente manuales.

Es obvio que este sistema de control basado en la experiencia del operador plantea dos serios inconvenientes: el primero la dificultad que puede suponer la introducción de un nuevo operario en dicho sistema, que no poseerá la experiencia de sus compañeros más veteranos.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

El segundo, y probablemente más importante, que ante una línea de galvanizado continuo, con tres turnos de trabajo y cuatro o más equipos diferentes, el coste de producción de un mismo producto es variable en función del equipo de trabajo.

A esto hay que añadir la imposibilidad de conocer el recubrimiento que se está obteniendo en tiempo real, o cuando menos la reducida fiabilidad que se le supone a los sistemas implantados con este objetivo. Debido a esto, el operador intentará proporcionar un sobrerecubrimiento con fin de evitar posibles rechazos por parte del laboratorio de control de calidad. Este recubrimiento extra supone un coste añadido al producto, coste que repercutirá negativamente en la propia empresa, ya que no será recuperado en el precio de venta, al tener que ser vendido al precio de su calidad nominal, y no a la de su calidad real, que será superior por tener una mayor cantidad de recubrimiento.

Curiosamente, este exceso de recubrimiento no supone un problema de rechazo por parte del cliente, ya que el zinc en exceso proporciona una protección extra frente a la corrosión, y en ningún caso empobrece al material. Es, por tanto, el problema aquí planteado un problema, no tanto de calidad, como económico.

Con el fin de mejorar la producción, evitando que el control del espesor del recubrimiento estuviese basado únicamente en la experiencia del operador del sistema, se han desarrollado diversos modelos analíticos. Estos modelos -que también han servido en líneas de reciente instalación para automatizar el sistema de control del recubrimiento- toman como entradas los diversos parámetros de la línea (velocidades, temperaturas, etc.), y utilizan métodos numéricos para proporcionar una estimación lo más exacta posible del recubrimiento.

Sin embargo, dada la gran complejidad de los procesos físico-químicos que tienen lugar durante el desarrollo del proceso de recubrimiento, los modelos existentes adolecen de un exceso de simplificación en las suposiciones, lo que les lleva a cometer una serie de errores, que posteriormente son corregidos en conjunto, mediante la introducción de una serie de constantes empíricas, válidas únicamente para una determinada línea de galvanizado.

Típicamente, el esquema convencional de implementación de un problema en un ordenador comienza por un análisis detallado del mismo. Tras este estudio, se desarrolla la solución mediante una sucesión de etapas, que dan lugar al algoritmo. Posteriormente, la codificación del algoritmo resultante, resume en un programa de ordenador la solución al problema propuesto.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Pero en ciertos problemas, esta metodología de solución al problema dado no resulta adecuada. Esto puede ser debido a la imposibilidad de desarrollar un modelo cuya codificación sea lo suficientemente sencilla para ser abordable. En otros problemas es aún peor: ni siquiera se sabe definir un algoritmo que permita dar solución al problema planteado.

Se constata pues, la necesidad de aplicar nuevas técnicas basadas fundamentalmente en la incorporación del conocimiento del proceso, inherente a los datos históricos.

Dentro de estas nuevas técnicas, destacan por su gran capacidad de adaptación las redes neuronales, sistemas basados en datos capaces de *aprender* a partir de los datos históricos proporcionados para su entrenamiento. Este tipo de tecnología puede ser aplicado a casi cualquier otro campo de la ciencia, donde se haga necesaria una predicción de resultados sobre la base de un conocimiento de datos anteriores en el tiempo. Un sistema como el aquí desarrollado, permite considerar en el modelo, todas aquellas peculiaridades que hacen única la instalación considerada. Estos sistemas pueden llegar a proporcionar predicciones correctas en un número de casos superior al 90%, siendo en el resto de los casos el error asumible.

Las redes neuronales han comenzado recientemente a aplicarse en procesos industriales, principalmente a partir de la limitación de representación no lineal. Esta propiedad, junto con su capacidad de abordar problemas cuando su complejidad no permite la elaboración de un modelo explicativo de los datos que se poseen, o no es fácil traducir en reglas los procedimientos establecidos.

Este trabajo, que pretende una puesta al día e investigación de la aplicación de la computación neuronal a problemas de modelado en la industria siderúrgica, se desarrolla en cinco capítulos, además de esta introducción, los anexos y las referencias cuyo contenido se describe a continuación.

En el *capítulo primero* se describe con detalle el entorno industrial del proceso de recubrimiento galvanizado, haciendo especial hincapié en el sistema de control por cuchillas de aire.

En el *capítulo segundo* se ofrece una perspectiva histórica de la evolución de los sistemas de control de recubrimiento en líneas de galvanizado continuo por inmersión, realizando posteriormente, un recorrido por los diversos enfoques que sobre modelos analíticos se han desarrollado, para terminar con una referencia a distintos sistemas inteligentes que, en esta

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

de implantación o de desarrollo, se pueden encontrar en la industria siderúrgica, comentándose con mayor detalle dos de estos ejemplos.

En el *capítulo tercero* se describen las diferentes técnicas que se utilizarán en el estudio de los datos históricos y el posterior modelado del proceso, distinguiendo tres grandes grupos: técnicas de selección de variables, para la determinación de aquellas variables con mayor influencia en el resultado final del proceso; las técnicas de proyección para la reducción dimensional del número de variables seleccionado y análisis de datos; y las redes neuronales, para la realización del modelo inteligente, discutiéndose en este apartado las distintas topologías ensayadas.

El *capítulo cuarto* describe y analiza los resultados obtenidos tanto con los métodos de selección de variables así como con los algoritmos de proyección, haciendo especial hincapié en los diferentes modelos basados en redes neuronales ensayados, y los resultados obtenidos.

Por último, el *capítulo quinto* resume las conclusiones derivadas del trabajo realizado y marca las líneas de actuación en que podrían ser acometidas en investigaciones posteriores.

El trabajo se acompaña de una bibliografía de consulta y referencia, así como de unos anexos en los que se incluye las tablas de correlaciones de variables, los listados de salidas de programa resultantes de la aplicación de los diferentes algoritmos de selección de variables, así como una implementación en código C de los modelos desarrollados, incluyéndose este código en soporte CD-ROM.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Capítulo 1

Descripción del Entorno Industrial

1.1 Planteamiento *6*

1.2 Evolución del Proceso de Recubrimiento por Zinc *7*
1.2.1 Sistemas de Control de Recubrimiento 8
1.2.2 Problemas del Proceso de Galvanizado en Continuo 13

1.3 Descripción de la Línea *14*
1.3.1 Sección de Entrada 16
1.3.2 Sección de Proceso 16
1.3.3 Sección de Salida 23

1.4 Sistema de Control de Recubrimiento *25*
1.4.1 Cuchillas y Pantógrafos 27

1.5 Factores que influyen en el recubrimiento *34*
1.5.1 Distancia de las Cuchillas a la Banda 35
1.5.2 Altura de las cuchillas con respecto al pote 35
1.5.3 Velocidad de la banda 35
1.5.4 Presión de Aire 35
1.5.5 Ángulo de las cuchillas 36
1.5.6 Geometría de los Labios de las Cuchillas 36
1.5.7 Forma de la Banda 36
1.5.8 Alineación de las Cuchillas con la Banda 36

1.6 Conclusiones *37*

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

1.1 Planteamiento

El control del espesor de recubrimiento en las líneas de galvanizado en continuo se ha abordado con técnicas muy diferentes. En la actualidad, el sistema empleado en la mayoría de las líneas de galvanizado en continuo es el conocido como *control por cuchillas de aire*. La banda continua de acero, tras sumergirse en el baño de zinc fundido, pasa entre dos toberas –denominadas cuchillas por su especial forma- que soplan aire a presión contra el recubrimiento de zinc cuando aún es líquido. La posición de dichas cuchillas y la presión del aire proyectado contra la banda, entre otros factores, determina la cantidad de zinc que permanecerá sobre la banda. El resto de zinc escurrirá hacia el baño de metal líquido.

Se pretende, en este capítulo, realizar la descripción completa de la línea de galvanizado continuo por inmersión. El sistema de control de recubrimiento será descrito con especial minuciosidad, dado que a él hacen referencia las mejoras propuestas en este trabajo. un mayor énfasis en el sistema de control del recubrimiento, por ser el objeto de este trabajo. Esta descripción, con modificaciones menores, es válida para la práctica totalidad de líneas de galvanizado continuo por inmersión instaladas en todo el mundo, pues todas ellas son muy similares.

El primer paso en la línea es la formación de una banda continua a partir de las bobinas de acero procedentes del tren tándem. A continuación, la banda atraviesa una serie de hornos en los que recibe un tratamiento térmico, paso previo a su inmersión en el baño de zinc líquido. De este baño, la banda sale verticalmente pasando entre las cuchillas de aire que regulan el espesor del recubrimiento. Tras atravesar una serie de pasos refrigerantes, recibir un tratamiento químico de pasivizado, para ser bobinada de nuevo.

Se identificarán, a lo largo de la descripción del proceso, aquellas variables de control relevantes para el adecuado espesor y uniformidad del recubrimiento de zinc sobre la banda.

El capítulo se cierra con una exposición de los objetivos pretendidos en este trabajo y unas conclusiones a modo de resumen de lo expuesto.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

1.2 Evolución del Proceso de Recubrimiento por Zinc

Los métodos de aplicación del zinc al hierro y de superficies de acero se han ido modificándose a lo largo de los años, cambiándose a su vez las instalaciones requeridas para su producción. Sin embargo, hasta 1936 los elementos básicos de los procesos de galvanizado, no experimentaron modificaciones fundamentales. El método empleado hasta entonces consistía en la limpieza por decapado de las superficies a galvanizar, el "*fluxing*" de la superficie para facilitar la humectabilidad con el zinc y el precalentamiento del material a galvanizar hasta la temperatura de recubrimiento.

Con el empleo de chapa laminada en frío como metal base para la chapa galvanizada, fueron añadiéndose al proceso otros pasos como la eliminación de aceites de laminación mediante limpieza alcalina y el recocido del acero antes del recubrimiento.

Siempre ha sido admitido por los expertos en galvanización que la preparación superficial del metal base, el control de la temperatura de recubrimiento y la composición del baño, son los factores que afectan en mayor medida a los productos galvanizados, y cuando son controlados estos tres factores en sus valores óptimos, se puede conseguir un producto recubierto de alta calidad.

En 1936 se dio un paso importante en los procesos de galvanizado continuo con la instalación en Butler (Pennsylvania) de la primera línea basada en el proceso de recubrimiento SENDZIMIR. Este proceso consigue mejoras importantes en los tres puntos anteriormente citados, los cuales son controlados fácilmente. La incorporación del recocido a la propia línea, elimina un proceso intermedio al recibir las bobinas a galvanizar directamente del tren de laminación en frío.

Básicamente, el proceso consta de:

- Limpieza previa de aceites de laminación y otros contaminantes en un horno de baja temperatura (400°C). En este horno se forma una capa de óxido superficial de espesor controlado.
- Un recocido posterior en un horno de atmósfera reductora (25% N_2-75% H_2) que elimina la capa superficial de óxido y coloca la banda a la temperatura de inmersión.
- Inmersión en el baño de zinc

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Posteriormente se incorporó en 1951 el proceso NO OXIDANTE a las líneas SENDZIMIR, que consiste en realizar la limpieza de la banda en horno no oxidante a temperaturas próximas a 1250ºC. Esto permitió reducir la longitud del horno de recocido y reducción al no ser ya necesario tanto tiempo de permanencia en el mismo.

1.2.1 Sistemas de Control de Recubrimiento

A lo largo del tiempo han existido diferentes sistemas para el control del espesor del recubrimiento. Por orden cronológico son los siguientes.

1.2.1.1 Control por Rodillos

Como primera etapa, fue implementado el control de recubrimiento por rodillos, en el cual una serie de rodillos actuaban como escurridores del exceso de zinc líquido. En este sistema intervenían los siguientes factores

- Diámetro de los rodillos.
- Altura del baño de zinc.
- Revoluciones por minuto de los rodillos.
- Velocidad de la banda.
- Forma y colocación de los surcos de los rodillos.
- Viscosidad del zinc.

Como principales inconvenientes de este sistema se pueden citar:

- Marcas producidas por los rodillos.
- Exceso de recubrimiento en los bordes.
- Irregularidad superficial.

Estos inconvenientes se acentuaban al aumentar la velocidad de la banda, ya que aparece una cantidad suplementaria de zinc que fluye desde el centro hasta el borde de la banda debido a la proporcionalidad entre el apriete de la banda por los rodillos y la velocidad de la línea.

1.2.1.2 Control por Chorro Gaseoso

La siguiente etapa vino dada por el control mediante chorro gaseoso, es decir, mediante un fluido a presión, que proyectado contra la banda, eliminaba el sobrante de material de recubrimiento aún líquido.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Cronológicamente, han existido sucesivamente, dos tipos de control por chorro gaseoso: por chorro de vapor recalentado, y por chorro de aire comprimido.

a) Chorro de vapor recalentado.

Este sistema se implementó entre 1963 y 1965, cuando japoneses y americanos desarrollaron este tipo de control del recubrimiento.

Las ventajas de este sistema con relación al de rodillos son:

- Mayor velocidad de la línea, con el consiguiente aumento de productividad.
- A igualdad de peso de recubrimiento, hay un incremento de un 20% a un 30% en la resistencia a la corrosión, como consecuencia del aumento en la uniformidad del recubrimiento.
- Desaparecen las marcas de las ranuras de los cilindros.
- Se consiguen fácilmente recubrimientos ligeros y pesados.
- Menor costo de personal y ahorro de zinc.
- Se adapta fácilmente a un control automático de recubrimiento.
- Menor costo de mantenimiento y menor número de paradas de línea.

En resumen, las ventajas son de calidad, coste y mantenimiento.

b) Chorro de aire comprimido.

El sistema de control mediante vapor recalentado proporcionaba espesor adecuado, pero el acabado no era el deseado. El hecho de utilizar vapor de agua recalentado hacía que la banda resultase con pequeñas manchas negras procedentes del agua. La sustitución del vapor de agua por aire proporciona todas las ventajas del sistema de vapor de agua, sin sus desventajas.

El desarrollo de este sistema se sigue realizando en el *RISC (Research Institute of Science and Technology of POSCO*, Pohang, República de Corea) y el *CLEIM Iron and Steel Maker*, (Cergy-Pontoise, Francia), y puede verse en *[Dav95]*, donde se hace una detallada explicación del sistema, y en *Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp.*, de Japón, como puede comprobarse en *[Ana97]*.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

El chorro de aire se lanza contra la banda recubierta del zinc aún líquido, mediante unas toberas llamadas cuchillas por su particular forma. Se dispone de una cuchilla a cada lado de la banda, localizadas sobre el nivel del baño de zinc.

Las cuchillas están diseñadas para producir flujo laminar hasta una determinada distancia de la boca. A partir de esta distancia aparece flujo turbulento, ensanchándose el chorro de aire, reduciéndose la fuerza del mismo por unidad de área e incrementándose notablemente el nivel del ruido en las proximidades del pote de zinc.

La fuerza del chorro depende de las siguientes variables, todas ellas ajustables:

- Presión interna en las cuchillas.
- Apertura de las cuchillas.
- Ángulo de incidencia.
- Distancia
- cuchilla-banda.

También es necesario mencionar la altura del chorro sobre el nivel del baño, ya que esta influye sobre la efectividad del control de recubrimiento.

Cada unidad incluye los siguientes puntos:

- Cuchilla.
- Viga soporte de las cuchillas.
- Tubería de distribución de aire.
- Uniones en cada extremo de la cuchilla.
- Acoplamiento rápido.
- Mecanismo hidráulico Abrir-Cerrar y Elevar-Descender.
- Mecanismo para ajustar el ángulo.

El extremo de la viga soporte contiene una suspensión cardan parcial ajustada sobre pasador en voladizo. La unión cardan suministra una flexibilidad completa en dos planos, pero es completamente rígida al movimiento de torsión que afecta a la distancia cuchilla-banda.

Las cuchillas se pueden abrir para inspección y limpieza mientras están colocadas sobre el nivel del baño, con lo cual se consigue un gran ahorro de tiempo.

Los elevadores de tipo pantógrafo están permanentemente montados en cada extremo de cada unidad. Estos elevadores soportan, suben y bajan los aparejos a través de un

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

mecanismo de corredera diseñado para proporcionar la máxima rigidez y el mínimo desapriete.

Las entradas de aire consisten en una manguera flexible de acero inoxidable y bridas con conexiones rápidas de aire.

El equipo auxiliar requerido está compuesto fundamentalmente por:

- **Rodillo estabilizador** dentro del baño fundido para que la banda de acero tenga una perfecta planitud a su paso ante las cuchillas.
- **Ventilador** que proporciona el aire a presión necesario para las cuchillas. Para mantener una presión constante, se dispone de un acumulador antes de la toma de aire a las cuchillas.
- **Equipo hidráulico para cierre de las cuchillas**, que consiste en una bomba operada por aire, un tanque, un acumulador, controles completos incluyendo válvulas solenoides y controles de flujo.

En este sistema de control, los factores que influyen en el revestimiento son:

- Velocidad de la banda.
- Ángulo de las cuchillas.
- Altura de las cuchillas con respecto al baño.
- Presión del aire.
- Distancia de las cuchillas a la banda.
- Forma de la banda.
- Alineación de las cuchillas con la banda.
- Galga de cuchillas. (forma de la ranura).
- Presión de cierre de las cuchillas.
- Control de bordes.

Actualmente se encuentra en fase de desarrollo, por parte de *Sumitomo Metal Industries Ltd*, de Japón, un sistema basado en modificar el chorro incidente actuando sobre la forma de los labios, evitando de esta manera complejos desplazamientos de las cuchillas. Puede seguirse este desarrollo en *[Iwa98]*.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Técnicas Electromagnéticas

Los sistemas neumáticos para el control del recubrimiento proporcionan buenos resultados pero poseen importantes restricciones –vibraciones inducidas en la banda, excesivo nivel de ruido, limitación de la velocidad de la línea y del mínimo recubrimiento posible, etc.-. Con la idea de superar estos inconvenientes, está siendo objeto de investigación una nueva tecnología basada en campos magnéticos. Dichos desarrollos se encuentran recogidos en *[Lloy98]*, y *[Mal98]*.

Se han desarrollado varias aproximaciones a esta idea. La primera consiste en rodear la banda mediante conductores eléctricos. Dicho conductor establece un campo magnético. Posteriormente se establece una corriente alterna en el recubrimiento de zinc. La interacción entre la corriente y el campo magnético genera una fuerza axial y otra radial que desplaza al zinc.

Una segunda aproximación al problema consiste en situar dos bobinas conductoras, cada una enfrentada a una cara de la banda. El campo magnético generado es normal al movimiento de la banda (flujo transversal), y la corriente inducida circula en el plano de la banda.

En la tercera aproximación, el inductor está constituido por un número de conductores alimentados por una corriente trifásica, y encerrados en material magnético. Esta configuración es equivalente a un motor de inducción lineal, y produce un campo magnético que se desplaza en la dirección opuesta al movimiento de la banda.

De este sistema basado en técnicas electromagnéticas se espera obtener las siguientes ventajas:

- Un incremento de la velocidad máxima de la línea.
- Un decremento del recubrimiento mínimo.
- Una disminución de las oscilaciones producidas por las cuchillas de gas, aún en el caso de utilizar los sistemas magnéticos y neumáticos combinados, debido al efecto centrador del sistema magnético.

Sin embargo, los resultados no excesivamente prometedores alcanzados hasta este momento, no permiten augurar una sustitución inmediata del sistema de cuchillas de aire por este novedoso sistema, ya que para obtener con las cuchillas electromagnéticas un rendimiento similar al alcanzado por el sistema de chorro de aire convencional, se hace

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

necesario la asistencia de un sistema de chorro de aire de pequeña potencia, lo que complica en gran manera el sistema de control de recubrimiento.

1.2.2 Problemas del Proceso de Galvanizado en Continuo

La calidad de la chapa galvanizada es el punto de mira de gran número de mejoras introducidas a través del tiempo en las líneas continuas de galvanizado. Se han ido introduciendo nuevas tecnologías encaminadas a la mejora de los siguientes aspectos:

- Adherencia del recubrimiento.
- Aptitud de la deformación.
- Tratamiento de acabado.

Sin embargo, subsisten algunos problemas como la peor deformación de la chapa galvanizada respecto a la chapa laminada en frío.

Sucede que la chapa galvanizada con estrella normal –figura que forma el zinc al cristalizar sobre la banda de acero-, es difícil de pintar y por esta razón se han lanzado al mercado dos clases de chapa de acabado mate, es decir, sin estrella, aunque hoy día, pintar la chapa de acabado normal ya no es ningún problema.

También parece claro que la resistencia a la corrosión en circunstancias normales, viene determinada por el espesor del recubrimiento, supuesto este constante.

Si el recubrimiento es uniforme y del mismo espesor, la vida de la chapa galvanizada está determinada por circunstancias naturales. La *Tabla 1.1* da una idea de esto.

VIDA EN AÑOS DE PRODUCTOS GALVANIZADOS							
		TIPO DE ATMÓSFERA					
Espesor (mm)	Peso (g/m2)	Rural	Marina Tropical	Marina Templada	Submarina	Urbana	Industrial
9.14	610.31	50	40	35	30	25	15
5.84	381.45	35	30	25	20	17	9
4.57	305.16	25	20	15	12	10	7
2.79	183.09	10	8	7	5	4	3
1.68	112.91	7	6	5	4	3	2
1.12	76.29	5	4	3	3	2	1

Tabla 1. 1 - Vida en años de productos galvanizados.(Fuente: ACERALIA Corporación Siderúrgica *[CSI85]*).

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

En esta tabla, ver *[CSI85]*, el peso de recubrimiento indica el total de ambas caras de la chapa, como es habitual al referirse a productos galvanizados. Por otro lado, se observa claramente que la vida de la chapa es proporcional al peso o espesor de recubrimiento. Dado que la resistencia a la corrosión de la chapa viene dado por la zona con menor espesor de recubrimiento de zinc, la uniformidad del mismo es de vital importancia.

1.3 Descripción de la Línea

El material de partida son bobinas de acero procedentes de laminación. Las bobinas tienen ya el espesor requerido. Para transformar las bobinas en una banda continua estas se debobinan, despuntando la cabeza y la cola de la bobina, y se sueldan a solape. Las impurezas arrastradas de la laminación se eliminan mediante el calentamiento en atmósfera no oxidante. Una vez limpia la banda, esta se somete a un ciclo de calentamiento y enfriamiento, conocido como recocido, para mejorar las características mecánicas de la banda.

A continuación, la banda se sumerge en un pote con zinc fundido quedando revestida de este metal. El control del revestimiento se realiza proyectando aire a presión sobre la banda recubierta.

Si durante el almacenamiento o transporte se produjeran condiciones suaves de oxidación se formarían sobre la superficie de la banda manchas blancas correspondientes a la presencia de óxido. Este fenómeno no supone una disminución de las características anticorrosivas del recubrimiento, pero si desluce el aspecto de la banda. Para prevenir su aparición, se somete a la banda a un tratamiento superficial de ácido crómico. Después de este proceso, la banda es aplanada obteniéndose el producto acabado bien en forma de bobinas, o de chapas cortadas.

Las principales características una línea de galvanizado tipo son:

Material		Banda de acero reducido en frío y banda temperizada
Espesor	**mín.**	0.3mm (0.012")
	Max.	4.2 mm (0.164")
Ancho	**min.**	609.6 mm (24")
	Max.	1270 mm (50")

Tabla 1. 2 - Características del Material de la Línea

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Bobinas de entrada	
Diámetro interior	508 mm (20")
Diámetro exterior	1854 mm (73")
Pesos	20385 Kg (45000 lb.)

Tabla 1. 3 - Características de las bobinas de entrada.

Bobinas de salida		
Diámetro interior		508 mm (20")
Diámetro exterior		1854 mm (73")
Pesos		20385 Kg (45000 lb.)
Espesor de recubrimiento	**Min** **Max**	90 gr/m^2 900 gr/m^2

Tabla 1. 4 - Características de las bobinas de salida.

Chapas de salida		
Longitud de la chapa	**Min.** **Max.**	965 mm (38") 6096 mm (240")
Peso del paquete		9060 Kg. (20000 lb.)
Peso del paquete de rechazos		6795 Kg. (15000 lb.)

Tabla 1. 5 - Características de las chapas de salida.

La línea puede considerarse dividida en tres secciones:

- **Sección I o de Entrada** que comprende las unidades de debobinado, enderezado, corte y soldadura.
- **Sección II o de Proceso** que comprende la unidad de tensión, horno de proceso, unidad de revestimiento, control de revestimiento, equipo de enfriamiento, unidad de tratamiento químico y unidades de aplanado.
- **Sección III o de Salida** que comprende el equipo de bobinado y de salida de bobinas, tijera, aplanadoras, inspección, apiladora y salida de chapas de rechazo, apilado y salida de chapas de 1ª calidad.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Velocidad de la línea	
Sección I (entrada)	5.5 a 114 m/min (18 a 375 f.p.m)
Sección II (proceso)	5.5 a 114 m/min (18 a 375 f.p.m)
Sección III (Rebobinado y corte)	5.5 a 114 m/min (18 a 375 f.p.m)
Sección III (salida de chapa)	15 a 137 m/min (50 a 450 f.p.m)
Velocidad de enhebrado	23 m/min (75 f.p.m)

Tabla 1. 6 - Velocidades de la línea en sus diferentes secciones.

1.3.1 Sección de Entrada

La línea dispone de *skids* para carga de bobinas, que pueden almacenar varias bobinas del ancho máximo.

Las dos debobinadoras son del tipo mandril expandible y disponen de un carro desplazable, transversal y verticalmente, por medio de un sistema hidráulico. La banda se endereza a la salida de las debobinadora en dos aplanadoras. Una unidad doble de tiro, tira de la banda para su enhebrado.

La tijera doble nº1 de corte hacia atrás, operada neumáticamente, sirve para despuntar los extremos de las bobinas y eliminar la banda fuera del espesor requerido. A la entrada de la tijera se encuentra una unidad doble de rodillos de tiro.

A continuación, se dispone de una soldadora del tipo solape con punzón, que ejecuta la unión de los extremos de la bobina con la cabeza de la siguiente, para producir banda continua. El punzonado tiene por objeto facilitar la detección de la soldadura. A la entrada de la soldadura, está localizada una unidad de rodillos de tiro.

1.3.2 Sección de Proceso

La tensión de la banda se mantiene a través de los rodillos de tensión (brida) nº 1.

Al objeto de mantener constante la velocidad en esta sección, se dispone de un almacenamiento de banda, realizado por el carro de lazos nº 1. Dos rodillos guía permiten el correcto centrado de la banda. A continuación se dispone la unidad de tensión nº 2 y de una unidad para medir la tensión de la banda.

El horno de proceso puede someter a la banda a diferentes tratamientos térmicos: normalizado, recocido y *full-hard*, aunque es el segundo el más habitual en esta producción. Se puede dividir a su vez, en cinco zonas:

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

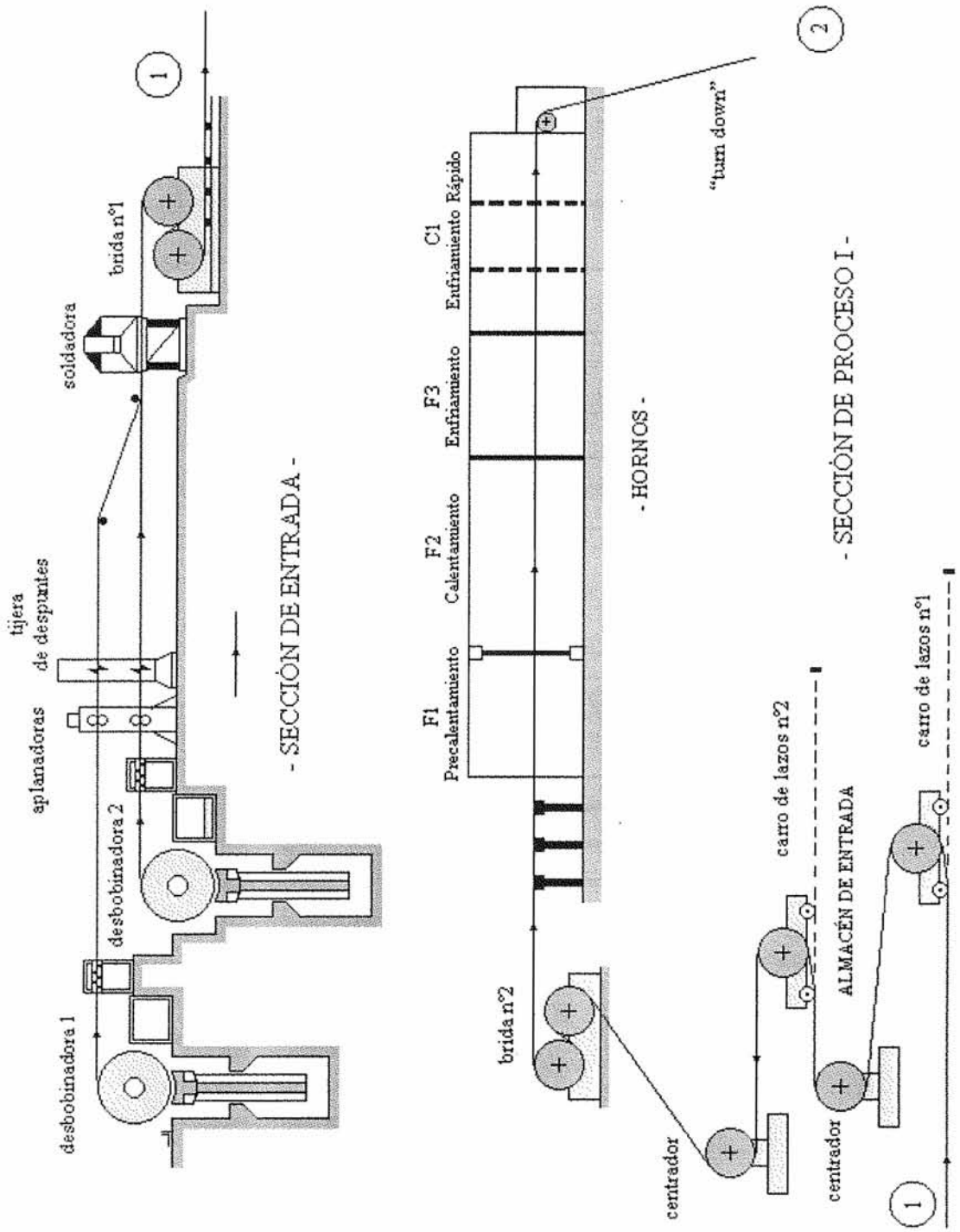

Figura 1. 1 - Sección de entrada de la línea de galvanizado

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

- **Zona de Precalentamiento y Limpieza (F-1)**. La misión de esta sección es limpiar la banda, que procede directamente del Tren Tándem, y calentarla hasta una temperatura de 450-800ºC, según espesores y ciclos térmicos.

  La limpieza se realiza por volatilización de los aceites de laminación, arrastre mecánico de partículas de suciedad y reducción del óxido superficial, al pasar la banda entre dos filas de mecheros cuya llama, reductora y abierta, calienta las zonas hasta una temperatura máxima de 1260ºC.

  Esta sección tiene un total de 24 mecheros de gas de hornos de cok, de mezcla de tobera. De estos mecheros, 12 están situados sobre el paso de banda y los otros 12 en la parte inferior, colocados todos ellos al tresbolillo. A efectos de regulación y control, el conjunto se divide en cuatro zonas de 6 mecheros cada una.

  Cada zona tiene dos termopares de Pt/PtRh 13%, uno de control y otro de seguridad. Un instrumento electroneumático regula la temperatura, de acuerdo con la señal que recibe del termopar de control, actuando sobre las válvulas de aire y gas de la zona de mecheros.

  La temperatura de la banda se mide mediante un pirómetro de radiación. Un instrumento electroneumático que recibe la señal eléctrica del pirómetro y la transforma en señal neumática. Mediante esta señal gobierna el funcionamiento de las cuatro zonas de mecheros en función de las variaciones respecto a la temperatura de banda consignada en el instrumento.

  Conseguir una perfecta limpieza de banda es fundamental para lograr una buena adherencia. Si esta sección no consigue limpiar la banda, o si, por el contrario, se oxida por una mala composición de la llama (llama oxidante), será imposible lograr un recubrimiento de calidad.

- **Zona de Calentamiento (F-2)**. La banda limpia, y a una temperatura de 450-800ºC, procedente de F-1 es calentada en esta sección hasta una temperatura superior a 780ºC.

  El calentamiento se realiza por radiación. El sistema de calentamiento está compuesto por 52 tubos radiantes en U equipados con mecheros de gas de hornos de cok de 75.000 Kcal.. La mitad de estos tubos están situados sobre el paso de banda y la mitad

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

restante en la parte inferior. A efectos de regulación y control, los tubos radiantes se encuentran divididos en cuatro zonas. En cada zona hay dos termopares de chromel-alumel, uno de seguridad y otro de control. Un instrumento electroneumático de regulación por zona, recibe la señal eléctrica del termopar de control y la transforma en señal neumática que actúa sobre la válvula de aire de combustión, regulando su caudal en función de las desviaciones respecto a la temperatura de consigna. Los reguladores de gas de zona son gobernados mediante la señal variable que procede de los colectores de aire de combustión de los mecheros.

A su paso por esta sección, la banda está protegida con atmósfera de HN contra la oxidación. La oxidación de la banda podría producirse como consecuencia de la entrada de aire por alguna fuga o por rotura de un tubo radiante.

A su paso por esta sección, la banda alcanza su máxima temperatura en todo el proceso (aproximadamente 800°C), siendo la temperatura máxima de la zona 980°C.

- **Zona de Enfriamiento Controlado (F-3).** La banda, que a su paso por la sección anterior alcanzó su máxima temperatura, durante el recorrido por F-3 se enfriará de modo controlado, para conseguir unas características mecánicas adecuadas. El enfriamiento se realiza mediante un intercambio de calor banda-atmósfera. La atmósfera se refrigera por medio de tubos enfriados por aire.

  La sección está dividida en dos zonas. La primera tiene 18 tubos de refrigeración distribuidos en igual número en la parte superior y en la inferior del paso de banda. La segunda tiene 18 tubos en la parte superior y el mismo número en la inferior. El aire de refrigeración lo suministra un ventilador para cada zona.

  Para el secado del refractario, calentamiento y mantenimiento de temperatura, cada zona tiene instalado en su bóveda un circuito de resistencias eléctricas.

  En cada zona hay dos termopares de *chromel-alumel*, uno de seguridad y otro de control. La señal eléctrica del termopar de control se transforma, mediante un instrumento electroneumático, en una señal neumática que acciona la válvula de mariposa que regula el caudal de aire que circula por los tubos de refrigeración, en función de las desviaciones respecto de la consigna de temperatura. Las resistencias solo entran en funcionamiento cuando aún con la refrigeración al mínimo la temperatura permanece excesivamente baja.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

En esta sección, una oxidación de la banda sería irreversible por estar el hidrógeno de la atmósfera a una temperatura excesivamente baja. La temperatura de banda a la salida de eta sección se mide mediante un pirómetro, y varía entre 600-800ºC según el ciclo térmico.

Zona de enfriamiento Rápido "*Jet Cooling*" (C-1). En esta sección se enfría la banda hasta una temperatura más adecuada para realizar el recubrimiento, esto es ligeramente superior a la del baño. La sección se divide en tres zonas iguales cuyo funcionamiento es gobernado por la señal neumática emitida por un instrumento electroneumático, que a su vez recibe una señal eléctrica de un pirómetro de radiación. Este pirómetro mide la temperatura de la banda inmediatamente antes de la entrada de la banda al baño.

La circulación de aire en cada zona se realiza por medio de un ventilador que aspira la atmósfera de la zona a través de un intercambiador de calor refrigerado por agua. El caudal de atmósfera, ya fría, se regula mediante una persiana que se posiciona en función de la señal neumática procedente del pirómetro. Este caudal regulado es enviado por el ventilador a dos colectores de superficie perforada, a través de cuyos orificios se proyecta sobre ambas caras de la banda, enfriándola. El ciclo vuelve a empezar a partir de este momento, pero no es realmente un circuito cerrado, ya que la atmósfera del horno es renovada a razón de 300 m^3/h. Es imprescindible mantener esta sección totalmente exenta de fugas debido a que la presencia de oxígeno oxidaría la banda de forma irreversible, impidiendo la adherencia.

La temperatura de la banda, a la entrada del baño, debe ser lo más estable posible, ya que las variaciones de temperatura favorecen la disolución del acero en el zinc.

- **Zona del "*Turn Down*"**. Desvía la banda hacia el pote. El conducto de bajada cierra estanco con el nivel del metal fundido en el pote.

El pote de zinc ha sido diseñado para mantener fundido el zinc de revestimiento. La fusión se realiza mediante calentamiento eléctrico. La temperatura de fusión se mantiene mediante el calor que aporta la banda, o mediante resistencias eléctricas, si este no fuera suficiente.

Un rodillo, denominado "*skin-roll*", se encuentra sumergido en el baño de zinc, a profundidad regulable. Su objeto es cambiar la dirección de la banda en el interior del pote.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Seis conductos, montados uno vertical y cinco horizontales, enfrían la banda mediante corriente de aire forzado. A continuación del conducto vertical, está localizado un rodillo deflector para cambiar la dirección de la banda.

Seguidamente se encuentra un rodillo deflector que desvía la banda hacia el equipo de tensión nº 3 (brida). A la cabeza de este equipo está localizado un rodillo deflector.

El tanque de enfriamiento enfría la banda mediante la proyección de agua pulverizada sobre ambas caras.

El sistema de control del revestimiento controla el espesor del revestimiento mediante la proyección de aire a alta presión contra ambos lados de la banda. Existe un equipo denominado "*Minimun Spangle*" cuya función consiste en romper la cristalización superficial del zinc, eliminando el floreado (estrella) característico.

La unidad de tratamiento químico tiene por objeto recubrir ambos lados de la banda con una leve película de CrO_4H_2, para prevenir la oxidación blanca que se podría producir en condiciones suaves de oxidación, tales como el almacenamiento en la nave o lluvia durante el transporte.

Para mantener constante la velocidad en esta sección se dispone del carro de lazos nº 2.

Cuatro rodillos deflectores conducen la banda por debajo del pote hasta el carro de lazos, y el equipo de rodillos guía. En dos de estos rodillos deflectores están localizados los equipos de la galga para medir el espesor del revestimiento.

Cuando el espesor de la banda sea inferior a 2mm el aplanado se realizará por medio de la C.S.I. (*Continuous Stretch Leveling*) o aplanadora. Los rodillos de flexión de esta unidad se abrirán al paso de la soldadura por una señal emitida por una célula fotoeléctrica montada a la salida del carro de lazos. Cuatro juegos de rodillos de tensión producen la tensión suficiente para obtener alargamientos de hasta el 2%. A la salida de esta unidad existe un equipo de rodillos para la medida de la tensión de la banda, indicando la uniformidad de la medida la planitud de la banda.

En otras líneas este aplanado puede venir precedido de un "*Skin-pass*", que dote al material de las características mecánicas, y rugosidad superficial adecuadas.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

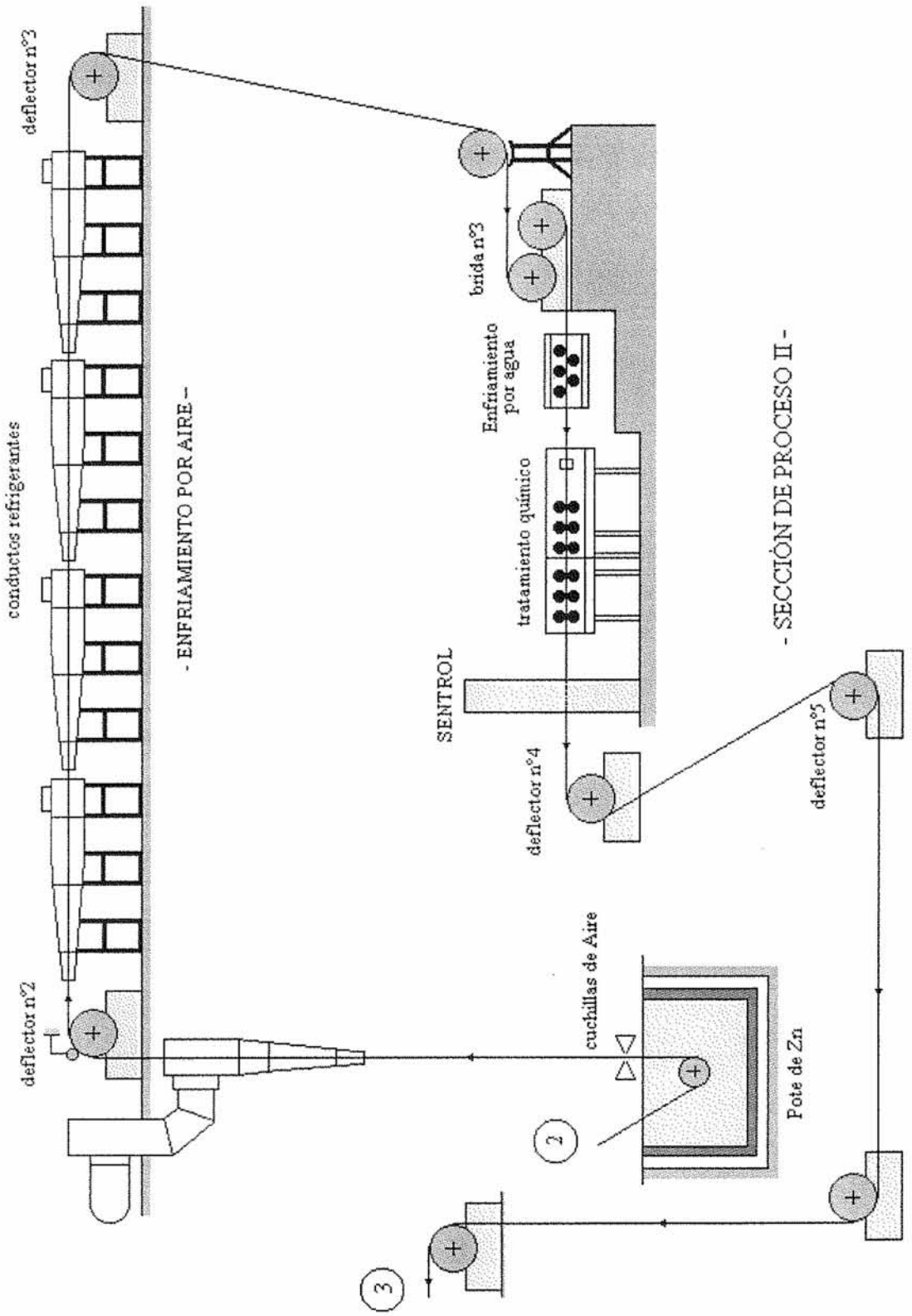

Figura 1. 2 - Esquema general de la sección de proceso.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

1.3.3 Sección de Salida

Se dispone de 2 bobinadoras de mandril expandible dotadas de un control hidráulico automático para el centrado de la banda. Una de ellas puede actuar como debobinadora para alimentar la sección de corte de chapa. Según pedido, las bobinas pueden ser aceitadas en máquinas aceitadoras dispuestas a la entrada de las bobinadoras. Cada bobinadora dispone, para su descarga, de un *skid* con capacidad para el almacenamiento de 2 bobinas de ancho máximo.

A continuación, se dispone de una unidad de rodillos de tiro (*pinch roll unit*) y de un foso de lazos a la entrada de la sección de corte para quitar tensión a la banda y favorecer el guiado de la misma a la entrada de la tijera.

Las chapas, de longitud predeterminada, se obtienen mediante una tijera. Cuando el espesor de las chapas está comprendido entre 0.3 mm (0.012") y 1.5 mm (0.060"), el proceso se realizará mediante la aplanadora de 38mm (1½"). Los espesores mayores deberán procesarse con la aplanadora de 63.5mm (2½"). El espesor se verifica mediante una galga de rayos X instalada a la entrada de la tijera volante. Las chapas serán impresas con la marca de fabricación mediante un marcador operado mecánicamente, instalado en la mesa de inspección.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

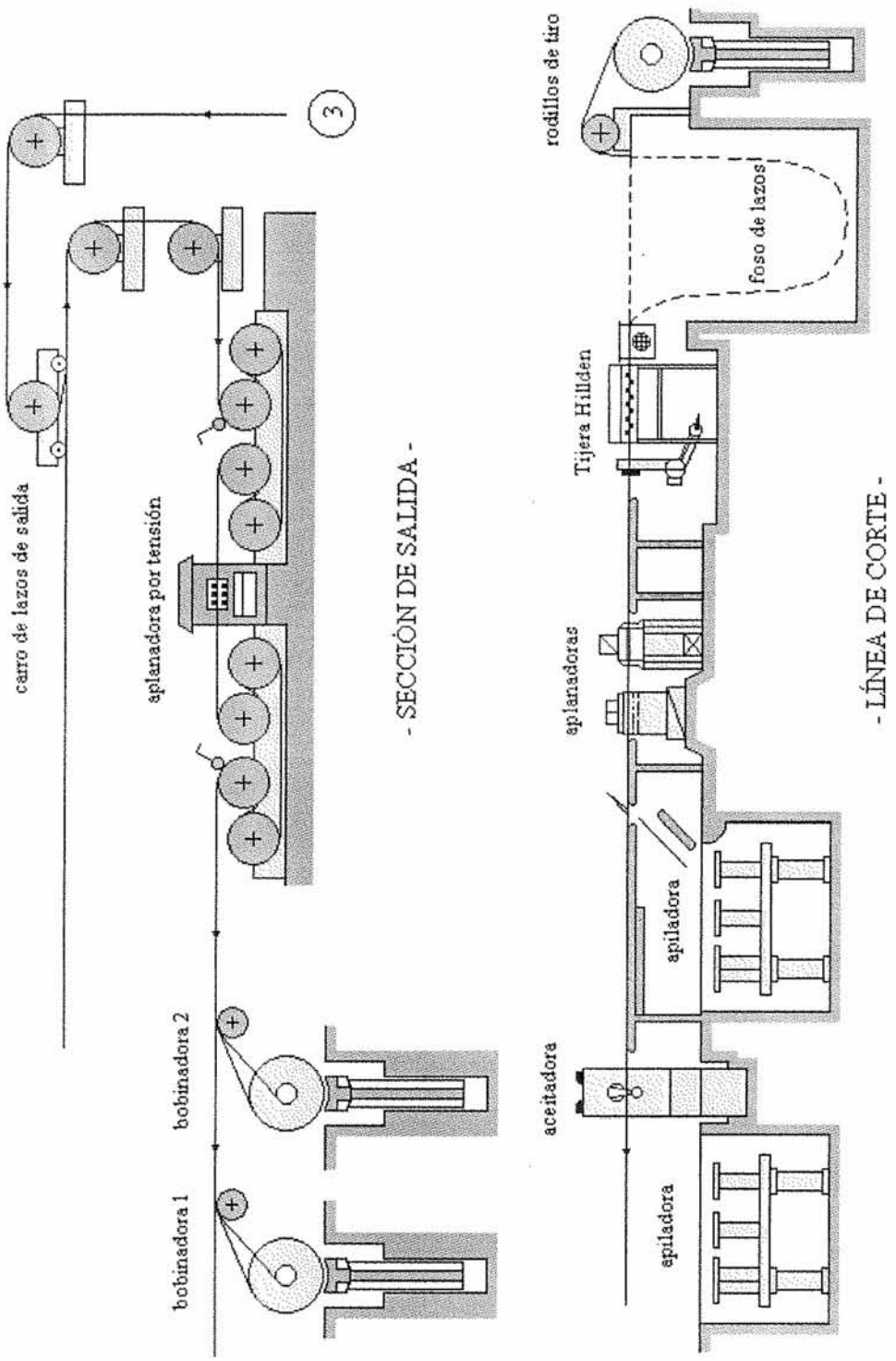

Figura 1. 3 - Esquema general de la sección de salida y la línea de corte.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

1.4 Sistema de Control de Recubrimiento

El sistema de recubrimiento utilizado en la práctica totalidad de las líneas de galvanizado en continuo es el de "cuchillas de aire". Este sistema no ha sido aun mejorado siendo el vigente actualmente. En este apartado se describirá de forma detallada su modo de actuación. Descripción General

Las cuchillas de control del revestimiento están diseñadas para producir un chorro de aire con las características de un flujo laminar. Se dispone de una cuchilla a cada lado de la banda localizadas sobre el nivel del baño. El chorro laminar de aire se dirige contra la banda que emerge del metal fundido, impactando perpendicularmente sobre la misma, cortando de este modo la película húmeda del metal del revestimiento; el exceso de zinc escurre hacia abajo, dirigiéndose nuevamente al pote. La película del metal que permanece sobre la banda, presenta excelentes propiedades de aspecto superficial y uniformidad a todo lo ancho de la banda.

Las cuchillas están diseñadas para producir un flujo laminar hasta una distancia del borde de 20mm, a partir de la cual, aparece el régimen turbulento, ensanchándose el chorro de aire, reduciéndose la fuerza del mismo por unidad de área, e incrementándose el nivel de ruido.

Las cuchillas tipo tienen las siguientes características:

Características de las cuchillas de aire	
Presión del fluido	0.6 Kp/cm^2
Longitud de la abertura	1.524 mm (60")

Tabla 1. 7 - Características de las cuchillas de aire.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

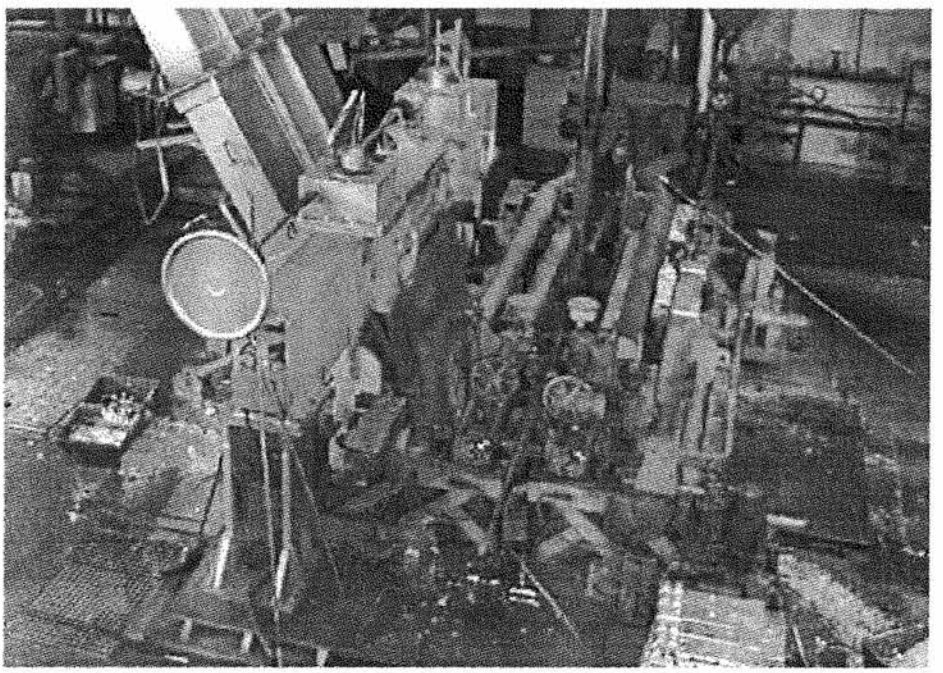

Figura 1. 4 - Vista general del pote de galvanizado, y de los distintos elementos necesarios para el control del recubrimiento.

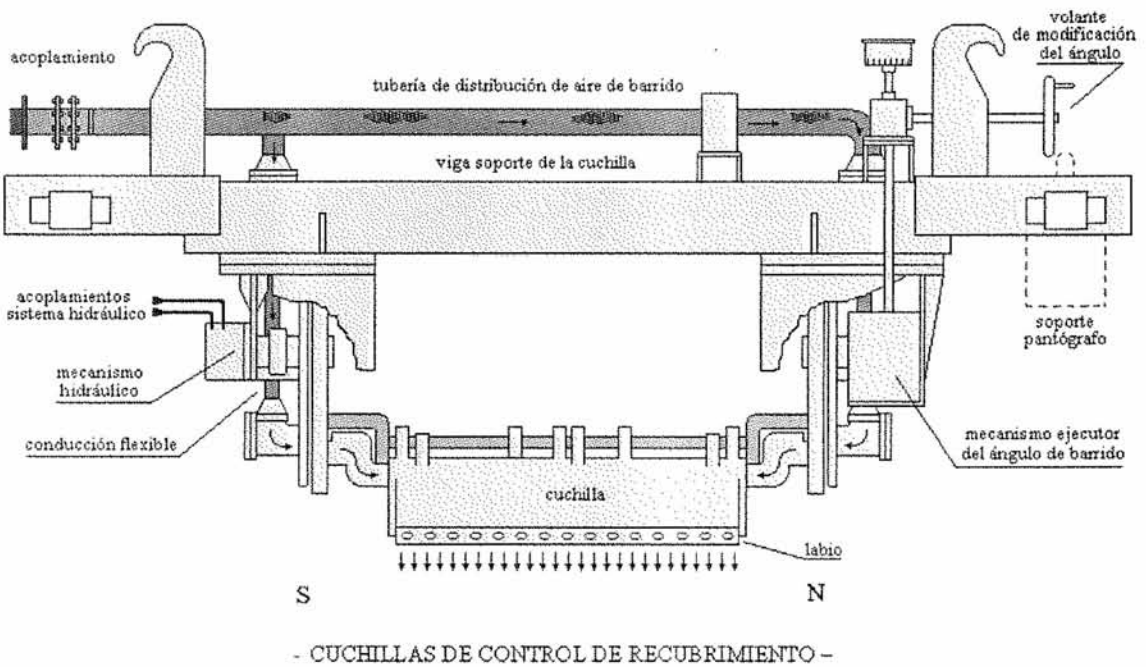

Figura 1. 5 - Esquema de una cuchilla, en el que se puede apreciar la cuchilla de aire propiamente dicha, y sus sistemas auxiliares.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Dos unidades componen un juego; las dos unidades de un juego son de mano opuesta, por lo tanto con las cuatro cuchillas se componen dos juegos con el objeto de tener uno en servicio y otro como reserva.

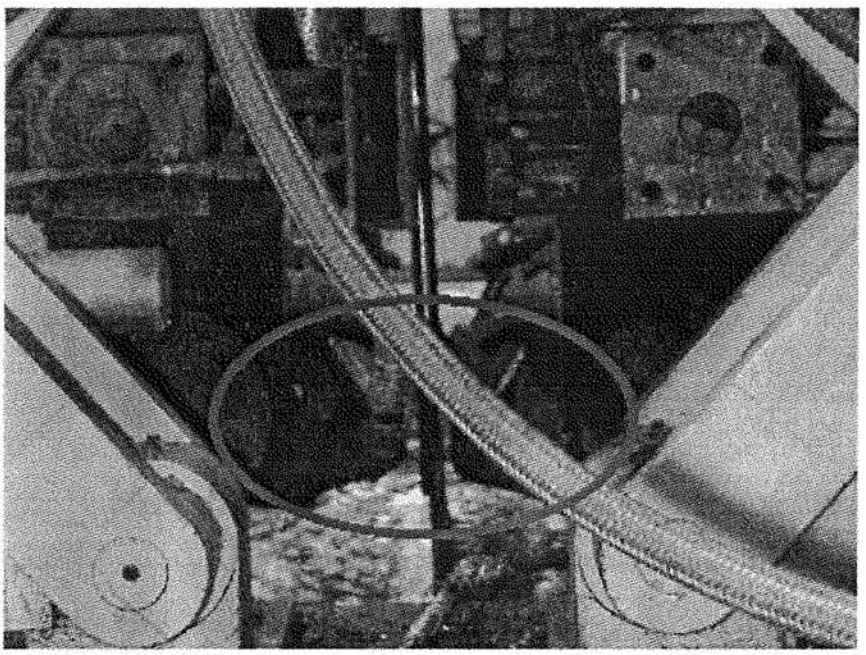

Figura 1. 6 - Detalle de las cuchillas de aire en funcionamiento sobre la banda ya galvanizada.

La pareja de cuchillas en servicio descansa sobre unos mecanismos articulados o pantógrafos, los cuales les dan rigidez frente al movimiento de torsión que afecta a la distancia cuchilla-banda y las capacitan para desplazarse vertical y horizontalmente con movimientos motorizados. Este diseño permite modificar la altura del chorro de barrido respecto al pote de zinc y la distancia cuchilla-banda.

El aire de barrido procede de una instalación concebida expresamente para tal fin, y la presión es suministrada por dos compresores localizados en el sótano de potes que trabajan de forma alternativa, haciendo el cambio, a partir del arranque, cuando se cambia el rodillo del pote.

1.4.1 Cuchillas y Pantógrafos

1.4.1.1 Cuchillas

Se denominan así a las unidades encargadas de proyectar el chorro de aire contra la banda. La soplante o cuchilla propiamente dicha, está formada por dos cuerpos articulados sobre un mismo eje, entorno al cual abren o cierran.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

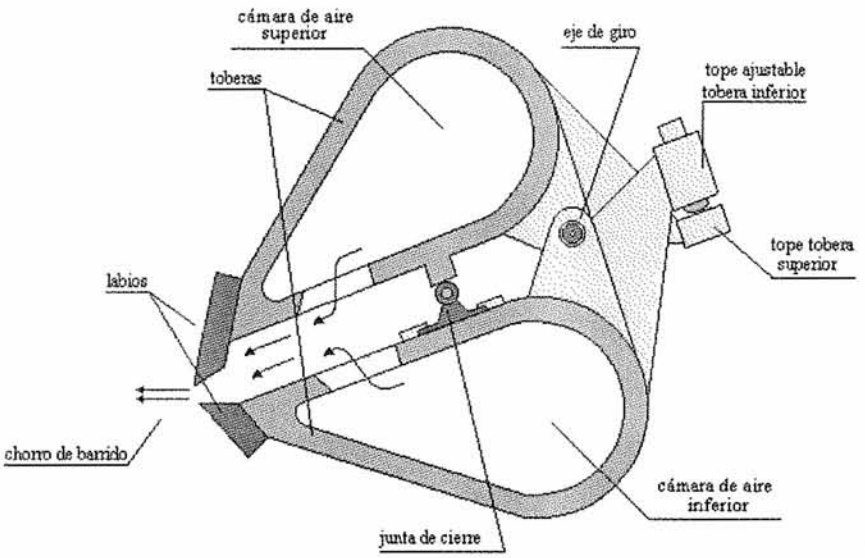

Figura 1. 7 - Corte esquemático de una cuchilla de aire.

En la posición cerrada, dejan una ranura calibrada a todo lo ancho de la cuchilla a través de la cual sale el aire de barrido. Este perfil de soplado es ajustable y queda definido por unas piezas externas denominadas labios.

Para permitir la maniobra de apertura o cierre, cada unidad lleva incorporado un mecanismo hidráulico.

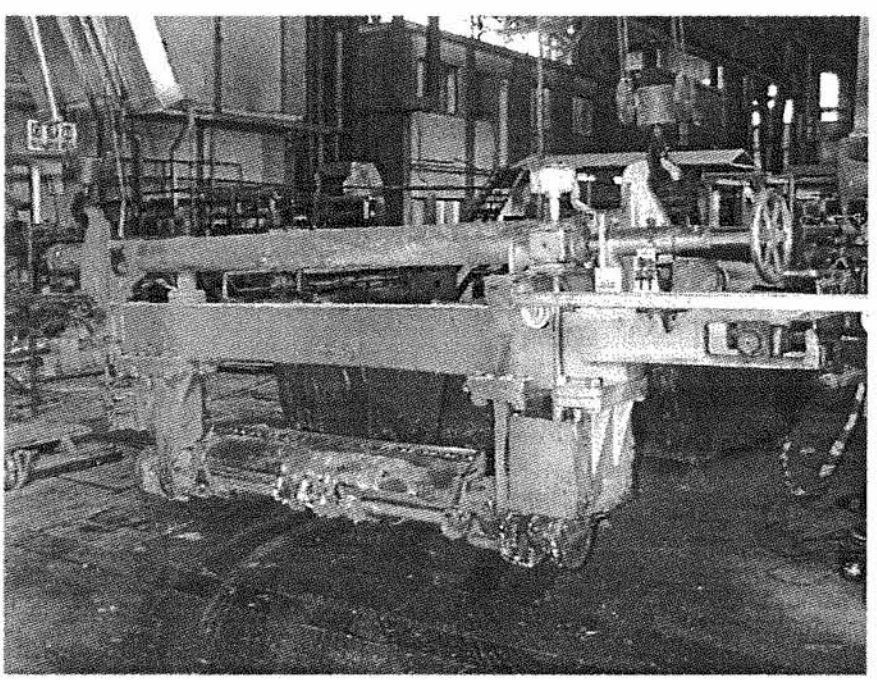

Figura 1. 8 - Imagen de una cuchilla siendo transportada, mediante un puente grúa, hasta el pote de galvanizado.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

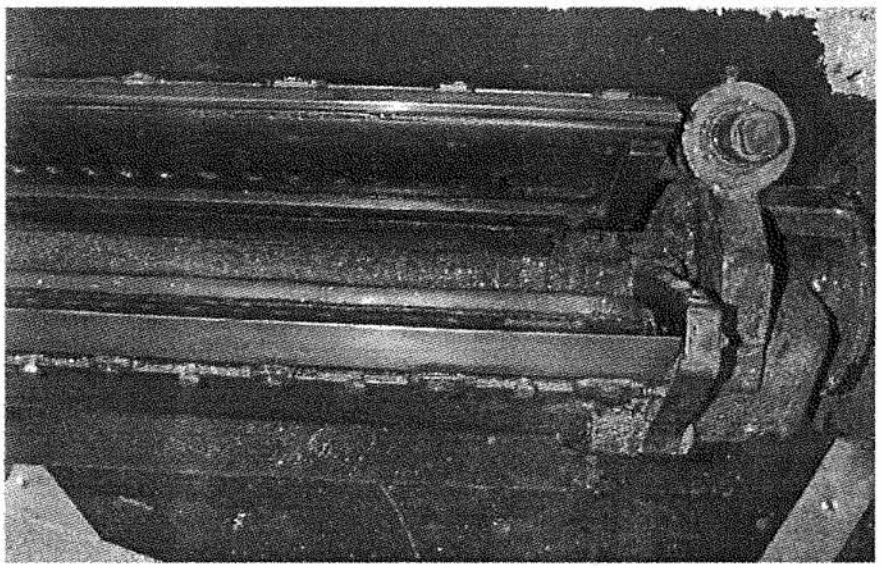

Figura 1. 9 - Interior de una de las cuchillas. Pueden apreciarse los orificios por donde el aire pasa de las cámaras a la boquilla de salida.

1.4.1.2 Pantógrafos

Los pantógrafos son los elementos encargados de efectuar el desplazamiento de las cuchillas, tanto en su eje horizontal como en el vertical. Cada pantógrafo posee dos motores eléctricos, uno para el desplazamiento horizontal y otro para el vertical. Cada cuchilla se apoya en dos pantógrafos colocados paralelos entre sí, por lo que es posible un movimiento diferencial entre los extremos de la cuchilla.

Cuatro unidades como la representada en la *Figura 1.10*, se encuentran montadas permanentemente a ambos lados del pote. Los extremos de las cuchillas descansan sobre ellos y los movimientos de cada una se controlan de forma independiente.

El desplazamiento máximo de los asientos receptores de cuchillas, alcanza los valores mostrados en la tabla 1.8.

Movimientos de los Pantógrafos	
Movimiento vertical	305 mm (12")
Movimiento Horizontal	203 mm (8")

Tabla 1. 8 - Movimiento de los pantógrafos.

Estos recorridos están limitados por finales de carrera. Los controles de operación están situados en la consola de control de cuchillas.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

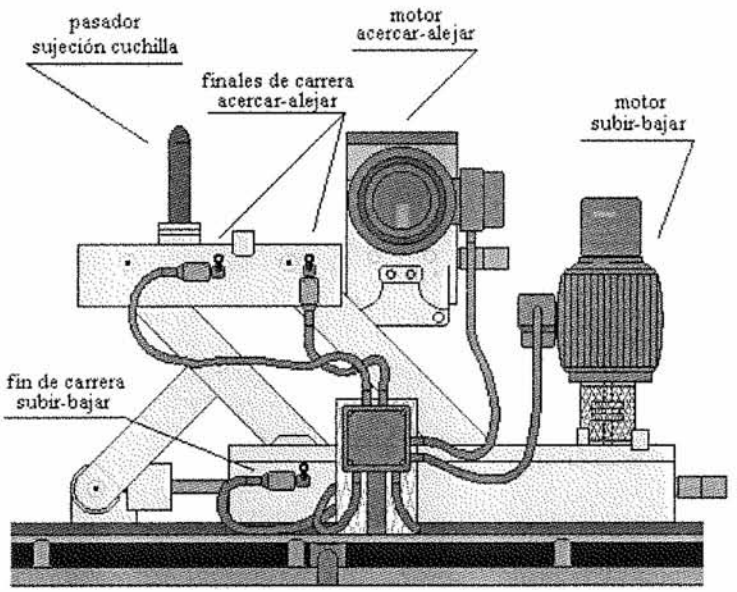

Figura 1. 10 - Pantógrafo sin la cuchilla..

Si a la *Figura 1.10* se le añade una cuchilla para completar el montaje, el resultado será la siguiente figura:

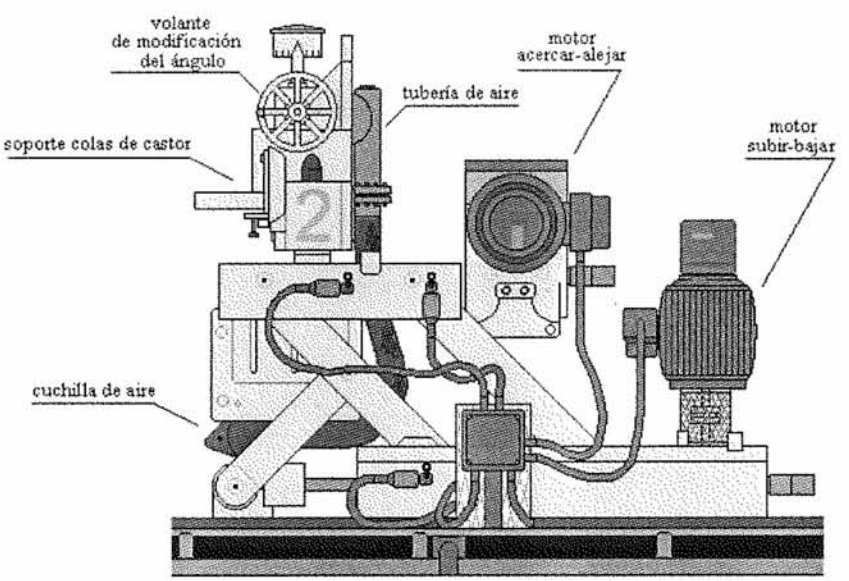

Figura 1. 11 - Pantógrafo de la cara Norte-Oeste, junto a su cuchilla.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

1.4.1.3 Ángulo de Barrido

Tal como se vio, las cuchillas incorporan un mecanismo que tiene por finalidad seleccionar la dirección del chorro de aire o ángulo de barrido. El rango de variación es de 20° y los límites son +5° y -15° con respecto a la horizontal. Las modificaciones del ángulo se realizan de forma manual accionando el volante incorporado a tal fin.

Normalmente, se trabaja con un ángulo de barrido de 0° en ambas cuchillas para todos los productos (chorro perpendicular a la banda). Esta orientación se consigue cuando la inclinación del eje de las cuchillas con respecto a la horizontal es de 20°, tal como se representa en las figuras.

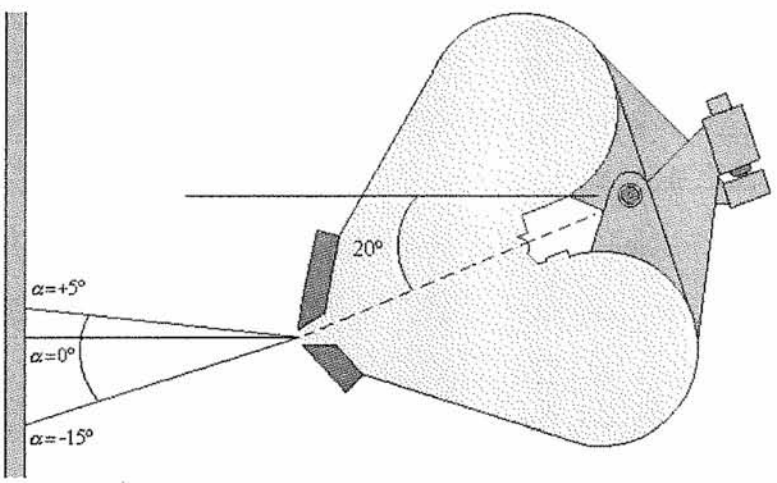

Figura 1. 12 - Posibles ángulos de soplado de las cuchillas de aire.

1.4.1.4 Perfil de Soplado

El comportamiento del chorro de aire sobre la banda depende, además de su dirección, del perfil de soplado o ranura de separación entre labios.

Este perfil ha de ser igual en ambas cuchillas. Las variaciones de perfil se consiguen conformando el labio inferior mediante los tornillos de regulación y amarre a la cuchilla o actuando sobre los topes de cierre, los cuales son igualmente ajustables.

Las cotas en los diferentes puntos a lo ancho de la cuchilla son las que se detallan en la *Figura 1.13*, dando lugar a unas ranuras simétricas respecto al eje vertical. Los perfiles enunciados representan la separación entre labios con la cuchilla cerrada a una presión en el sistema hidráulico de entre 110 y 120 Kp/cm^2.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

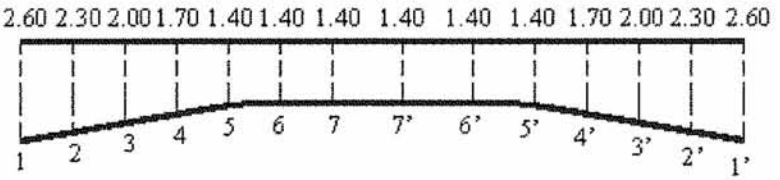

Figura 1. 13 - Cotas de las cuchillas para galvanizado (unidades en cm.).

1.4.1.5 Instalación de Aire de Barrido

El aire que se proyecta sobre la banda mediante las cuchillas se produce en una instalación generadora de aire comprimido dotada de un sistema de control propio. Los generadores de aire comprimido son dos compresores iguales que trabajan de forma alternativa siendo capaces de suministrar aire a una presión de 0.8Kp/cm^2. Cada equipo se compone de un filtro de aspiración, silenciador, compresor y motor eléctrico. El aire comprimido a una presión de 0.5-0.6Kp/cm^2 atraviesa un decantador de aceite que atrapa las partículas de aceite que el aire pueda llevar en suspensión, evitando que sean proyectadas sobre la banda donde producirían manchas.

Cada equipo está dotado de varios sistemas de seguridad, todos ellos de vital importancia para el buen funcionamiento de la máquina. Se controlan los siguientes parámetros:

- Presión de entrada de agua para la refrigeración.
- Temperatura del agua a la salida del compresor.
- Temperatura del aire comprimido a la salida del compresor.

Nivel de aceite. Todas estas alarmas, que forman el sistema de seguridad del compresor, activan unos avisadores en la cabina del pote..

Las operaciones de arranque y parada las realiza el operador desde la cabina del pote, sin más que oprimir el pulsador correspondiente, con la condición de que todas las emergencias estén apagadas.

El motor eléctrico dispone de un dispositivo de seguridad que corta su alimentación cuando por agarrotamiento o cualquier otra sobrecarga, el consumo supera los límites tolerables

Una válvula de descarga actuada neumáticamente y gobernada por un regulador, se encarga de mantener en el acumulador de entrada a las cuchillas, una presión estable de 0.5-0.6Kp/cm^2, dando más o menos paso de descarga en función del caudal que permitan las

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

válvulas reguladoras pasar a las cuchillas, las cuales son gobernadas por el operador desde la consola de operador de cuchillas.

1.4.1.6 Control del Aire de Barrido

La eficacia del chorro de aire que determina el recubrimiento final de la banda va a depender fundamentalmente de la distancia entre la cuchilla y la banda, y de su presión. En función del recubrimiento a obtener y las características del material en proceso, se actúa sobre estas variables para obtener el recubrimiento adecuado.

La eficacia del chorro aumenta a medida que disminuye la separación entre la cuchilla y la banda y viceversa. Normalmente, el recubrimiento se controla actuando sobre este parámetro..

La distancia cuchilla-banda es ajustada por el operador actuando sobre los pantógrafos desde la consola de operación de cuchillas.

Para algunos recubrimientos, dadas las limitaciones existentes en el desplazamiento de las cuchillas , será necesario complementar el ajuste de la distancia cuchilla-banda con el de la presión del chorro. De esta forma, combinando ambas regulaciones se obtiene el recubrimiento deseado con una disposición asequible de las cuchillas.

La presión del chorro es establecida por el operador fijando una consigna que marcará la apertura de la válvula reguladora de. En el control de esta presión intervienen una serie de instrumentos que se describen a continuación. Dado que el compresor es de funcionamiento continuo y suministra un caudal constante, mientras que en las cuchillas el consumo de aire es variable en función de las necesidades del proceso, entre el compresor y las cuchillas ha de mediar un sistema que permita aprovechar todo el aire o solamente una parte, descargando el sobrante a la atmósfera. Este sistema controla la presión de aire en el acumulador de entrada a las cuchillas. El regulador actúa en función de las variaciones de presión abriendo y cerrando una válvula de descarga. La presión en el acumulador se mantiene constante sea cual sea el consumo en el valor $0.6Kp/cm^2$. Para aumentar la presión del chorro se abrirán más las válvulas reguladoras de entrada a las cuchillas y, automáticamente, se cerrará la válvula de descarga, y viceversa.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

La regulación del caudal enviado tanto a las cuchillas como a la tubería de descarga se realiza mediante tres válvulas de accionamiento neumático iguales, con la única diferencia de que la señal de apertura o cierre en las primeras la fija el operador, mientras que la otra la recibe del regulador en función de las variaciones de presión en el acumulador.

1.4.1.7 Equipos Hidráulicos de Apertura y Cierre de Cuchillas

Se dispone de dos equipos hidráulicos para mantener las cuchillas cerradas durante el proceso y permitir las maniobras de apertura y cierre de las mismas cuando las circunstancias lo requieran.

Mediante una consola de selección de equipos, estos pueden entrar en funcionamiento alternativamente. El equipo seleccionado se conecta a los mecanismos hidráulicos de las cuchillas en servicio mediante un circuito común a ambos.

Básicamente, cada equipo se compone de un tanque contenedor de aceite, un filtro de aspiración, una bomba, un presostato, un acumulador, una válvula de seguridad, unos distribuidores actuados por solenoides, antirretornos y manómetros.

La presión hidráulica del equipo es controlada por un presostato que hace que esta se mantenga entre 110 y 120 Kp/cm^2, mediante la puesta en operación y parada de la bomba. Los movimientos de apertura y cierre de cada cuchilla van gobernados mediante dos distribuidores actuados por solenoides que se excitan mediante los selectores de la consola de operación de cuchillas, permaneciendo siempre una de ellas excitada..

Tres manómetros indican la presión del circuito; uno instalado en el propio equipo, y otro conectado al circuito de cierre de cada cuchilla. Estos últimos no indican la presión real, sino algo más debido a la influencia de la presión del aire de barrido que tiende a abrir la cuchilla. Estos manómetros se encuentran al lado de la consola de operación de cuchillas.

1.5 Factores que influyen en el recubrimiento

En función de las características del sistema que controla el recubrimiento se identifican una serie de parámetros que marcan la adecuación del producto a los requisitos de calidad establecidos (espesor, uniformidad en el recubrimiento, ausencia de acumulaciones, etc) y que se detallan a continuación.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

1.5.1 Distancia de las Cuchillas a la Banda

Cuanto mayor es la distancia entre las cuchillas, mayor es la cantidad de zinc que permanece sobre la banda.. La separación debe estar por debajo de un máximo, 25mm, ya que al sobrepasarlo aparece un flujo turbulento que origina un exceso de zinc en los bordes de la banda –denominándose a este fenómeno *bordes pesados*- y una distribución irregular del revestimiento. Sin embargo, una posición de las cuchillas muy próxima a la banda haría que el flujo de aire podría ser perturbado por salpicaduras de zinc, dejando zonas de la banda sin un adecuado soplado, lo que daría lugar a un cordón de zinc a lo largo de la banda.

1.5.2 Altura de las cuchillas con respecto al pote

Esta variable no está relacionada con el control del revestimiento, la idea es que estén lo más cerca posible de la superficie del pote, con el objeto de que el revestimiento llegue a las cuchillas lo más fluido posible. La distancia viene limitada por la proyección del baño contra el equipo. Como norma general, no es conveniente bajar de 100mm o sobrepasar los 300mm.

1.5.3 Velocidad de la banda

El peso del recubrimiento es directamente proporcional a la velocidad de la banda, pues cuanto más rápida pasa la banda por el baño, más material arrastra. Esta velocidad vendrá dada por el espesor de recubrimiento a obtener y por el espesor de la banda, no descartándose que pudiera estar fijada por el tratamiento térmico a recibir en los hornos. La velocidad efectiva de la línea oscila entre los 50m/min –para espesores de banda muy grandes-, hasta los 114m/min –para espesores muy pequeños-.

1.5.4 Presión de Aire

Hay una relación proporcional entre la presión de aire y el espesor de recubrimiento. Cuanto mayor es la presión de aire, mayor será el recubrimiento obtenido. En la práctica, resulta más efectivo y cómodo mantener constante estas presiones, y controlar el recubrimiento modificando la posición de las cuchillas. Esto se debe a dos razones: es más difícil realizar el ajuste fino de la presión que el de la posición de las cuchillas, y el mayor tiempo de respuesta del sistema frente a variaciones de la presión de soplado.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

1.5.5 Ángulo de las cuchillas

No afecta en gran medida al peso del recubrimiento, pero su inadecuación puede producir bordes defectuosos. La posición ideal para lograr un buen recubrimiento es aquella que mantiene las cuchillas perpendiculares a la banda. Pero, trabajar con las cuchillas en esta posición conlleva dos inconvenientes:

1. Al estar las dos cuchillas enfrentadas, se produce un choque de los dos chorros de aire en la parte donde no existe banda, produciéndose un elevado ruido para los operarios que trabajan en esa zona.
2. Por otra parte, al estar en línea las cuchillas se proyectará material fundido de los bordes de la banda hacia los labios de las cuchillas, formando incrustaciones que impedirán la salida de aire en esas zonas y en definitiva produciendo un mal lavado, que es objeto de rechazo.

1.5.6 Geometría de los Labios de las Cuchillas

Cuando el control del revestimiento se realiza mediante cuchillas de labios paralelos y sin dispositivos de control de bordes, se presenta un problema de distribución que consiste en un aumento del espesor del recubrimiento en los laterales de la banda. Para evitarlo se da forma al labio inferior, haciendo que los dos extremos sean ligeramente más anchos que la zona central, véase la *Figura 1.13*. Dicha forma es ajustable mediante unos tornillos repartidos de forma equidistante a lo largo de toda la cuchilla.

1.5.7 Forma de la Banda

Si esta no pasa paralela a las cuchillas, los recubrimientos obtenidos no son uniformes. Es posible eliminar este defecto actuando sobre el rodillo estabilizador según convenga.

1.5.8 Alineación de las Cuchillas con la Banda

A veces la banda no pasa paralela entre las cuchillas, produciéndose recubrimientos no uniformes, siendo estos mayores en las zonas de la banda más alejadas de las cuchillas, y menores en las zonas más próximas a las cuchillas. Para eliminar este defecto cada cuchilla dispone de un tornillo-husillo de control manual, que lo hace avanzar de la cabeza que se desee.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

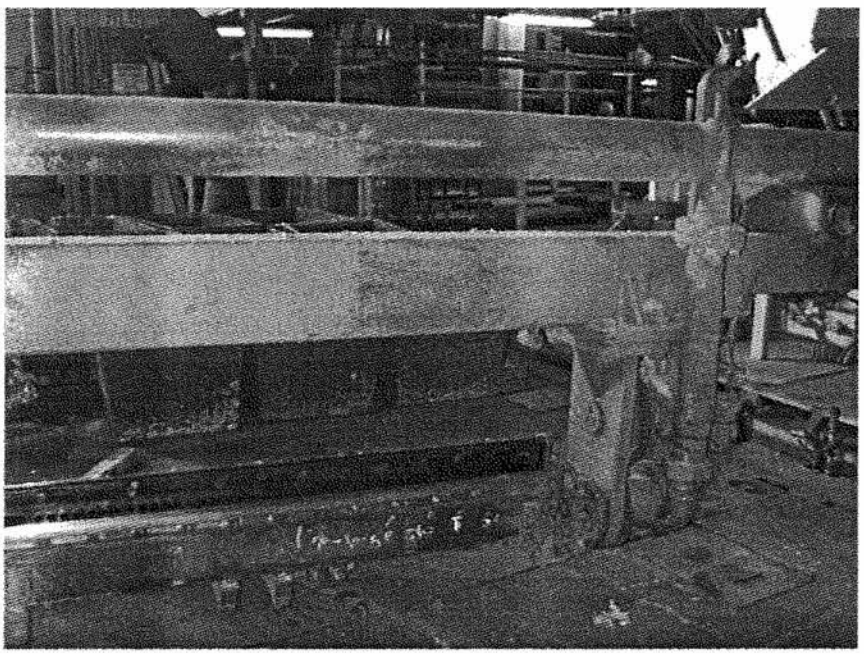

Figura 1. 14 – Cuchilla con los labios abiertos. Se puede apreciar los tornillos que permiten ajustar la forma de dichos labios.

1.6 Conclusiones

Las líneas de galvanizado continuo responden a un esquema común. Las bobinas de acero son convertidas en una banda continua que a es limpiada mediante calentamiento no oxidante. Al finalizar la limpieza, a la banda se le dan las características mecánicas deseadas mediante un ciclo de recocido, que consta de un calentamiento y enfriamiento controlada en cuanto a temperaturas y a intervalos de tiempo. Es en este momento cuanto se realiza el galvanizado a través de la inmersión en un pote con zinc fundido. Con el fin de evitar defectos superficiales, tras el enfriamiento de la banda esta es sometida a un tratamiento químico.

La calidad del producto, en cuanto a características anticorrosivas, viene marcada por el espesor del recubrimiento de zinc y por la uniformidad del mismo. El sistema empleado en la práctica totalidad de líneas de este tipo instaladas en el mundo es el control por cuchillas de aire. Sobre la banda inciden dos chorros de aire que eliminan el zinc sobrante devolviéndolo al pote.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Los clientes exigen mayores precisiones en los espesores de recubrimiento y en los acabados del producto. Esto, unido al alto precio relativo del zinc y a sus características como contaminante, hacen necesario mejoras en el sistema de control del recubrimiento.

Las mejoras de calidad sólo serán posibles cuando se perfeccione el sistema de control de recubrimiento.

este control no debería ser realizado en función del subjetivo punto de vista de un operario debiendo ser encomendado a un modelo que fuese capaz de determinar en cada momento las acciones necesarias para obtener el recubrimiento deseado.

Los factores más relevantes en el control del recubrimiento son la distancia de las cuchillas a la banda, la velocidad de la banda, la presión de soplado del aire y el ángulo de las cuchillas. Estas serán los datos de partida del modelo en que se basará el sistema de control.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Capítulo 2

Estado de la Técnica

2.1 Introducción *40*

2.2 Modelos de Analíticos de Recubrimiento *40*
2.2.1 Modelo Analítico de Thornton 43
2.2.2 Limitaciones del Modelo 59

2.3 Otras Aproximaciones *62*
2.3.1 Modelo de Malmedier 62
2.3.2 Modelo de Lloyd Jones 62
2.3.3 Modelo de Szekely 63
2.3.4 Modelos de Elementos Finitos 66
2.3.5 Métodos Multifase (VOF) 68

2.4 Modelado Avanzado *70*
2.4.1 Aplicación de Técnicas Inteligentes de Modelado a la Industria del Acero. 70
2.4.2 Modelo para un Tren de Laminación de Chapa 73
2.4.3 Modelo del Espesor de recubrimiento de Estaño para una Línea de Hojalata 75

2.5 Conclusiones *77*

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

2.1 Introducción

Los sistemas de control de recubrimiento para líneas de galvanizado en continuo por inmersión han sufrido una importante evolución a lo largo de los años; tanto más importante si se tiene en cuenta los enormes costes que supone la instalación de una nueva línea de producción, o la modificación de una ya existente, lo que invita al conservadurismo a los gestores de dichas instalaciones.

Excepto en algunos desarrollos recientes, como el control por campos magnéticos - actualmente en fase de investigación y desarrollo-, el sistema actualmente más utilizado es el control por cuchillas de aire, por lo que el desarrollo matemático aquí expuesto se aplica a ese modelo.

Este capítulo esta dedicado a mostrar la base teórica sobre la que se han asentado los diferentes modelos analíticos desarrollados durante los últimos 25 años.

Se partirá del modelo más conocido, desarrollado por John A. Thorton (*Telic Corporation*) y Hart F. Graff (*Armco Steel Corporation*) en 1976, *[Tho76]*, que ha servido de base para numerosos desarrollos posteriores. . Además de describir el modelo se mostrarán sus debilidades y limitaciones. Posteriormente, se muestran otros desarrollos más modernos, la mayoría de ellos basados en el propuesto por Thorton, que actualmente están sirviendo de base para el desarrollo de sistemas de control mediante fuerzas electromagnéticas.

Dado que en este trabajo, se plantea una aproximación basada en técnicas alternativas de tratamiento de datos, el capítulo finaliza con una exposición de desarrollos que aplican técnicas similares en siderurgia.

2.2 Modelos de Analíticos de Recubrimiento

El objeto de los modelos analíticos es analizar el fenómeno de arrastre del zinc, que combinado con el soplado de aire por parte de las cuchillas y el retorno de parte del metal líquido al baño debido al efecto de la gravedad, configuran el sistema que permite controlar el espesor del recubrimiento de zinc sobre la banda de acero durante el proceso de galvanizado.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

El modelado físico del problema (mediante las ecuaciones matemáticas que rigen los procesos físicos que constituyen el problema) puede realizarse considerando de forma independiente los dos flujos que intervienen: el flujo de zinc líquido que arrolla por la banda, y el flujo del chorro de aire acabador, procedente de las cuchillas. Posteriormente es necesario reunir ambos efectos en una única ecuación.

Para el modelado se tendrán en cuenta las siguientes ecuaciones:

- *Ecuación de continuidad* que expresa la idea de conservación de la masa, es decir, la suma de masas entrantes y salientes, por unidad de tiempo, en un volumen de control, debe de ser igual a la variación de densidad en la unidad de tiempo, ver *[Sch87]*.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\rho \vec{v}) = \frac{d\rho}{dt} + \rho div \vec{v} = 0 \qquad (2.1)$$

donde

ρ	Densidad del fluido de recubrimiento (kg/m^3)
$\vec{v}$	Velocidad (m/s)
t	Tiempo (s).
p	Presión (N/m^2)

- *Ecuación tensión-deformación* que expresa la relación entre el tensor de tensiones y el tensor de velocidades de deformación: el tensor que tiene en cuenta la variación de forma y el tensor que tiene en cuenta la variación de volumen.

- *Ecuación del equilibrio dinámico* que expresa la idea de conservación de la cantidad de movimiento. La fuerza resultante que actúa sobre el fluido en un volumen de control, en una dirección determinada, es igual a la suma de la variación de la cantidad de movimiento en dicha dirección dentro del volumen de control en la unidad de tiempo, más el flujo neto de cantidad de movimiento que sale a través de las superficies de control en la dirección determinada, en la unidad de tiempo. Bajo las hipótesis de fluido homogéneo, viscoso, isótropo y relación lineal entre los componentes del tensor de tensiones y los del tensor de velocidad de deformación, la ecuación del equilibrio dinámico es la conocida *Ecuación de Navier-Stokes*.

  Dicha ecuación en su expresión general para un fluido newtoniano, en su forma vectorial, por unidad de volumen, es la siguiente:

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

$$\rho(\bar{v}\nabla)\bar{v} + \rho\frac{\partial\bar{v}}{\partial t} = \bar{f} - \nabla p + \mu\Delta\bar{v} + \frac{\mu}{3}\nabla(div\bar{v}) \qquad (2.\ 2)$$

donde

μ	Viscosidad del fluido de recubrimiento (Kg/m.s).
$\bar{f}$	Fuerzas exteriores que actúa sobre el fluido.

En el caso particular de este problema, la única fuerza que actúa sobre el fluido es la fuerza de la gravedad. Por lo tanto:

$$\bar{f} = \rho\bar{g} \qquad (2.\ 3)$$

donde $\bar{g} = (0,0,g)$ $\quad g = -9.8\, m/s^2$.

En el caso particular de que el campo de vectores $\bar{f}$, que representa la acción de campos externos $\bar{f} = -\nabla U$, con un campo gravitacional másico, $U = -gz$, se tiene:

$$\rho(\bar{v}\nabla)\bar{v} + \rho\frac{\partial\bar{v}}{\partial t} = -\rho\bar{g} - \nabla p + \mu\Delta\bar{v} + \frac{\mu}{3}\nabla(div\bar{v}) \qquad (2.\ 4)$$

Y si se formula la hipótesis de que el fluido es incompresible, $\nabla\bar{v} = 0$, y que el movimiento del fluido es lento, se pueden despreciar las fuerzas inerciales $(\bar{v}\nabla)\bar{v} = 0$, y resulta:

$$\rho\frac{\partial\bar{v}}{\partial t} = -\rho\bar{g} - \nabla p + \mu\Delta\bar{v} \qquad (2.\ 5)$$

que es la ecuación de Navier-Stokes para un fluido incompresible sometido a la acción de un campo gravitacional.

donde

$\rho\frac{\partial\bar{v}}{\partial t}$	Variación temporal de cantidad de movimiento por unidad de volumen.
$\rho(\bar{v}\nabla)\bar{v}$	Término convectivo.
$\bar{f}$	Fuerzas exteriores, actuando sobre el fluido
∇p	Fuerza debida al cambio de posición, por la no uniformidad del campo de presiones.
$\mu\Delta\bar{v}$	Fuerza debida a la disipación viscosa. Se denomina *difusión de*

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

cantidad de movimiento.

$\frac{\mu}{3}\nabla(div\bar{v})$ Deformación volumétrica (divergencia de velocidad). Es nula si el flujo es incompresible.

- *Ecuación de conservación de la energía* o primer principio de la termodinámica. En la aplicación a la mecánica de fluidos, el calor aportado se utiliza para el trabajo mecánico y para el aumento de la energía interna.

  La ecuación de la energía interna tiene la forma :

$$\rho\frac{\partial u}{\partial t} = div(k\nabla T) - pdiv\bar{v} + \Phi_v \qquad (2.6)$$

  siendo:

  $\nabla(k\nabla T)$ Flujo de calor aportado al sistema desde el exterior.

  $\frac{\partial u}{\partial t}$ Variación total de la energía interna en el transcurso del tiempo.

  Φ_v Función de disipación de Rayleigh. Disipación viscosa de energía por unidad de tiempo, de volumen y de masa.

- *Ecuación de estado* de los gases. En el caso de los gases ideales toma la forma:

$$\frac{p}{\rho} = RT \qquad (2.7)$$

  donde

  R Constante de Boltzman (0.082 $N.m/Kg.K$)

  T Temperatura absoluta (K)

2.2.1 Modelo Analítico de Thornton

Aunque el problema de recubrimiento es tridimensional, dada la gran dificultad que presenta el modelado de los diferentes procesos físicos que aparecen durante el proceso de galvanizado, la mayor parte de los modelos existentes se han realizado para dos dimensiones, ver *[Tho76]* y *[Dav95]*, sin que esto represente un inconveniente excesivo en la industria a la hora de incorporar dichos modelos al proceso productivo.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

La gran mayoría de los modelos analíticos para líneas de galvanizado se basan, como ya se ha comentado, en el desarrollado por John A. Thornton y Hart F. Graff en 1976, ver *[Tho76]*. En dicho modelo se propone una división en regiones, mostrada en la *Figura 2.1*, que será mantenida por la mayor parte de los investigadores hasta la actualidad. Estos autores asumen hasta 14 hipótesis de trabajo algunas de las cuales, tal como se demostrará más adelante, resultan excesivamente simplistas y difícilmente realistas.

2.2.1.1 Aproximación General

El modelo se afronta dividiendo el problema en seis regiones, tal como se muestra en la *Figura 2.1*.

La ***región I*** es una región de transición entre el flujo provocado dentro del baño por el movimiento de la banda, y el flujo del líquido en la superficie de la banda, mantenido sobre ella por las fuerzas viscosas. Naturalmente, las características del movimiento del líquido en dicha región, dependerán de la velocidad de la banda a su paso a través del baño, la posición de los rodillos estabilizadores dentro del baño, y de la existencia de óxido u otras perturbaciones en la superficie del baño.

La ***región II*** va desde la anterior región, hasta la zona de impacto del chorro acabador. El flujo es constante en esta región y resulta de un balance entre las fuerzas viscosas, de dirección ascendente, ejercida por el movimiento vertical de la banda, y la fuerza de la gravedad, de dirección descendente.

Estando actuando el chorro acabador, el movimiento del recubrimiento sobre la banda está compuesto por dos partes: un flujo ascendente y otro descendente. El primero se desarrolla en la zona cercana a la banda, mientras que el flujo descendente, cuyo sentido es debido al impacto del chorro sobre el recubrimiento en movimiento ascendente, con efecto de una inversión del sentido, se desarrolla en la zona externa del recubrimiento. El espesor de esta zona, que es constante, satisface dos condiciones:

- El flujo total ascendente es igual al peso final del recubrimiento que lleva la banda.
- La masa total existente sobre la banda, es decir, la suma del flujo ascendente y del descendente, es la máxima que pueden soportar las fuerzas viscosas en el contacto banda-recubrimiento.

La ***región III*** es la región de interacción entre el chorro acabador y el fluido de recubrimiento. Esta interacción introduce un gradiente de presión sobre la superficie. Su

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

efecto es un flujo de presión que se superpone sobre el flujo de velocidad causado por el movimiento de la banda. En el extremo anterior de la zona de impacto el efecto es de oposición, pues los sentidos son contrarios. La consecuencia es la existencia de un "tope" de presión, que se comporta como si estuviera "midiendo" la cantidad de líquido e recubrimiento que puede ser arrastrada por la banda. (*Figura 2.1*)

En el otro extremo de la zona de impacto del chorro, el flujo de presión, se añade al flujo de velocidad. Este flujo deforma el perfil de velocidades sobre la banda hasta llegar al espesor indicado δ_3, provocando una ligera disminución de dicho espesor, ya que la velocidad es mayor.

La ***región IV*** es la que va a continuación de la zona de impacto. En ella no existen fuerzas debidas a las presiones inducidas por el impacto del chorro acabador. El perfil de velocidades de la zona de δ_3 (espesor de recubrimiento en la zona de impacto, ver *Figura 2.1*)se transforma bajo la acción de la viscosidad en un perfil de la forma mostrada en δ_4(espesor de recubrimiento en la región IV). Como en la región II, aquí se establece un balance entre las fuerzas viscosas y las fuerzas másicas (fuerzas gravitatorias).

La ***región V*** es la que contempla variaciones importantes de temperatura en el líquido de recubrimiento. Este enfría y comienza la solidificación, la viscosidad aumenta, y los perfiles de velocidad evolucionan hacia el perfil de velocidad constante mostrado en la región VI.

La ***región VI***, se corresponde con la zona en que el recubrimiento está ya totalmente solidificado y el espesor es el que definitivamente quedará sobre la banda.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

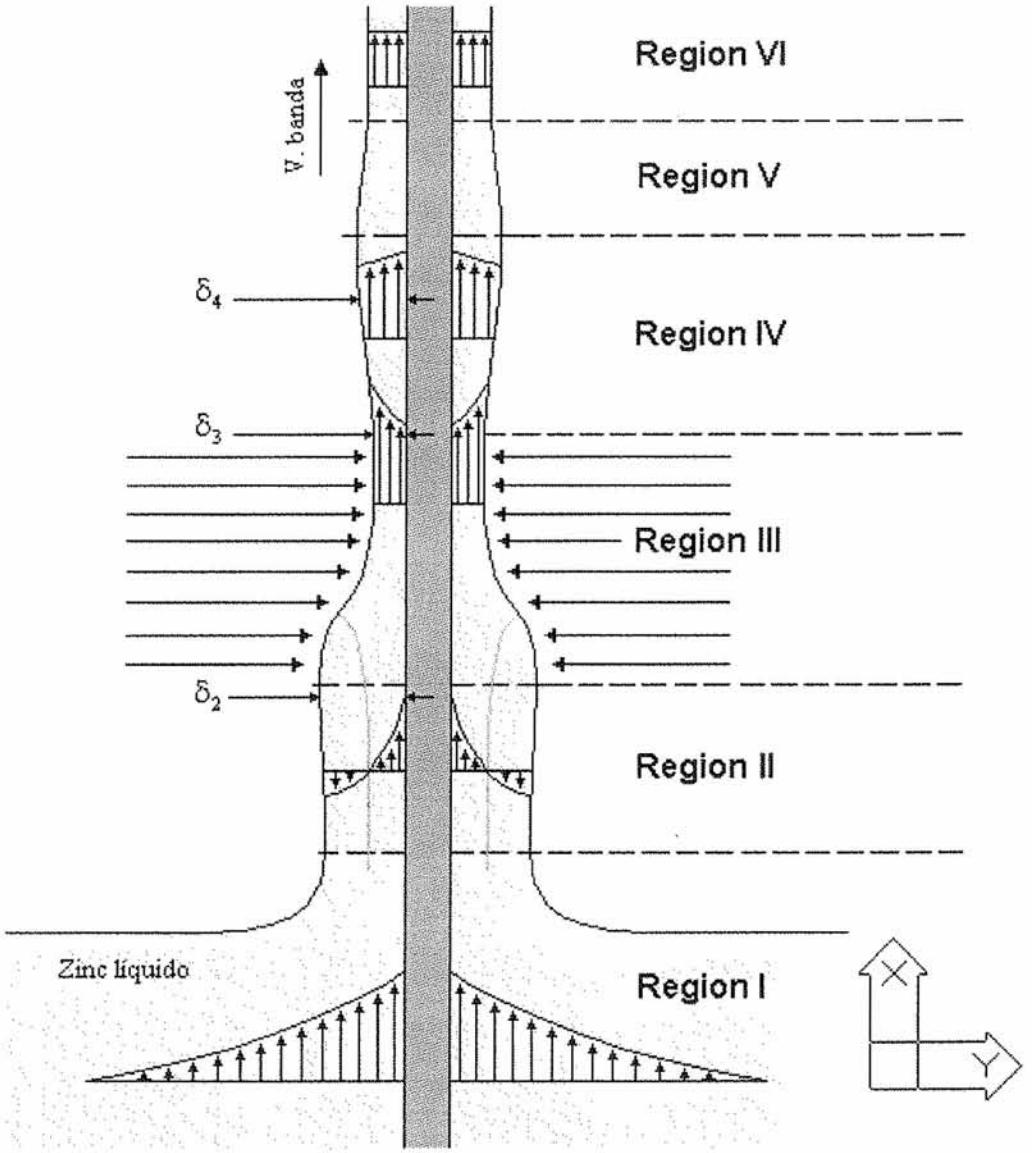

Figura 2. 1 - División en regiones del flujo de material de recubrimiento.

2.2.1.2 Supuestos Básicos del Modelo de Recubrimiento

El tratamiento analítico desarrollado por Thornton, está basado en los siguientes supuestos básicos:

- Se puede asumir que el flujo de fluido en la capa líquida puede ser descrito por las ecuaciones bidimensionales para flujo incompresible y estacionario, considerando la viscosidad constante y admitiendo que en la relativamente delgada capa de

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

recubrimiento, las fuerzas viscosas son mucho mayores que las fuerzas de inercia (*creep flow*).

- Las ecuaciones que describen el flujo de fluido pueden ser linealizadas por los métodos de análisis de la capa límite.
- Se desprecian los efectos de tensión superficial y oxidación.
- Los efectos de rugosidad superficial de la banda de acero son despreciables.
- Se asume que no existe deslizamiento entre el fluido de recubrimiento y la banda de acero en zonas de interacción banda-recubrimiento.

Bajo estas condiciones, el movimiento del fluido de recubrimiento vendrá descrito por las siguientes ecuaciones generales, consecuencia de la simplificación de las ecuaciones vistas en el apartado:

- Ecuación del movimiento:

$$\mu \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = \rho g + \frac{\partial p}{\partial x} \qquad (2.8)$$

donde:

U	Velocidad de la banda (m/s).
x	Coordenada vertical, con sentido positivo hacia arriba. Ver *Figura 2.1*
y	Coordenada horizontal, con sentido positivo en la dirección banda-cuchilla. Ver *Figura 2.1*

- Ecuación de conservación de la masa:

$$Q_0 = U.t = \int_{y=0}^{y=\delta} u(x,y)dy \qquad (2.9)$$

donde:

Q_0	Flujo volumétrico del líquido de recubrimiento por unidad de ancho de banda, ya solidificado (m^2/s).
$u(x,y)$	Velocidad del fluido de recubrimiento en la dirección paralela a la superficie de la banda, para un observador situado en el exterior (m/s).
e	Espesor del recubrimiento solidificado (m).

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

δ Espesor del recubrimiento aún líquido (m).

La primera ecuación muestra que el movimiento del fluido será consecuencia de un balance entre las fuerzas viscosas cortantes, la fuerza gravitacional y el gradiente de presiones que es inducido en el recubrimiento por las fuerzas exteriores. La segunda es la conocida ecuación de conservación de la masa.

2.2.1.3 Flujo de Recubrimiento Fuera de la Región de Interacción

Partiendo de las ecuaciones *(2.8)* y *(2.9)*, y dado que en esta región la presión de soplado no existe, las ecuaciones resultantes son las siguientes:

- La ecuación de Navier-Stokes queda reducida a:

$$\mu \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = \rho g \qquad (2.10)$$

La ecuación de continuidad se puede escribir como:

$$Q_0 = U.e = \int_{y=0}^{y=\delta} u(x,y)dy \qquad (2.11)$$

es decir, el flujo volumétrico por unidad de ancho de banda cuando ya está solidificado el recubrimiento ($U.e$), es el mismo que cuando está en estado líquido, que es la integral del último miembro

Si se resuelven las ecuaciones *(2.10)* y *(2.11)*, pueden obtenerse los perfiles de velocidad. La ecuación *(2.10)* es una ecuación diferencial de segundo orden, por tanto, para obtener el perfil de velocidad exacto, se deberán dar las condiciones de contorno apropiadas que se corresponden con las dos constantes que resultarán de su resolución.

Estas condiciones de contorno son las siguientes:

- Al no haber deslizamiento en la interfaz banda-recubrimiento, la velocidad u del recubrimiento en dicha interfaz será la misma que la de la banda, es decir, U.

$$\begin{cases} y = 0 \\ u = U \end{cases} \qquad (2.12)$$

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

- El gradiente de velocidad en la superficie del recubrimiento, $\frac{\partial u}{\partial y}$, es igual a 0, ya que no existen fuerzas exteriores de arrastre.

$$\begin{cases} y = \delta \\ \dfrac{\partial u}{\partial y} = 0 \end{cases} \qquad (2.\ 13)$$

Con estas dos condiciones, la expresión general del perfil de velocidad será la que sigue:

$$\mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \rho g \rightarrow \mu \frac{\partial u}{\partial y} = \rho g y + K_1 \qquad (2.\ 14)$$

Sustituyendo la condición *(2.13)* en la expresión anterior:

$$0 = \rho g \delta + K_1 \Rightarrow K_1 = -\rho g \delta \qquad (2.\ 15)$$

Con lo que la ecuación completa queda como:

$$\mu \frac{\partial u}{\partial y} = \rho g (y - \delta) \qquad (2.\ 16)$$

Integrando de nuevo:

$$\mu u = \rho g (\frac{y^2}{2} - \delta y) + K_2 \qquad (2.\ 17)$$

Con lo que sustituyendo la condición *(2.12)*:

$$\mu U = 0 + K_2 \Rightarrow K_2 = \mu U \qquad (2.\ 18)$$

Sustituyendo el valor de la constante en la ecuación *(2.17)*, resulta:

$$\mu u = \rho g (\frac{y^2}{2} - \delta y) + \mu U \Rightarrow$$

$$\Rightarrow u = U + \frac{\rho g}{\mu} (\frac{y^2}{2} - \delta y) \qquad (2.\ 19)$$

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Introduciendo el valor de u en la ecuación de conservación de la masa:

$$Q_0 = \int_{y=0}^{y=\delta} u.dy = \int_{y=0}^{y=\delta} [U + \frac{\rho g}{\mu}(\frac{y^2}{2} - \delta y)]dy =$$

$$= U\delta + \frac{\rho g}{\mu}\left(\frac{\delta^3}{6} - \frac{\delta^3}{2}\right) = U\delta - \frac{\rho g}{3\mu}\delta^3 \qquad (2.\ 20)$$

Esta fórmula general puede particularizarse para diversas condiciones particulares. Así se denomina perfil A al caso del perfil existente en la región II (donde se tienen dos flujos, uno ascendente y otro descendente), en el que el flujo neto sea 0.

$$\int_{y=0}^{y=\delta} u.dy = 0 \Rightarrow \left[U.y + \frac{\rho g}{\mu}\left(\frac{y^3}{6} - \delta\frac{y^2}{2}\right)\right]_0^{\delta} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow U.\delta - \frac{\rho g}{\mu}\frac{\delta^3}{3} = 0 \Rightarrow$$

$$\delta = \sqrt{3}\left(\frac{\mu U}{\rho g}\right)^{1/2} \qquad (2.\ 21)$$

Otro caso significativo es el llamado perfil B, en el que la velocidad de la superficie libre es 0. (*Figura 2.2*).

$$u = U + \frac{\rho g}{\mu}(\frac{y^2}{2} - \delta y);\ \begin{Bmatrix} y = 0 \\ u = 0 \end{Bmatrix} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 0 = U + \frac{\rho g}{\mu}\left(\frac{y^2}{2} - \delta^2\right) = U - \frac{\rho g}{2\mu}\delta^2 \Rightarrow$$

$$\delta = \sqrt{2}\left(\frac{\mu U}{\rho g}\right)^{1/2} \qquad (2.\ 22)$$

Sustituyendo este valor en la ecuación de la conservación de la masa:

$$\int_{y=0}^{y=\delta} u.dy = U.e_0$$

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

$$U.e_0 = U.\delta - \frac{\rho g}{3\mu}\delta^3 \Rightarrow e_0 = \delta - \frac{\rho g}{3\mu U}\delta^3 =$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{3}\left(\frac{\mu U}{\rho g}\right)^{1/2} = e_0 \qquad (2.\ 23)$$

Un tercer caso es el perfil C al que se le impone la condición particular de que el flujo neto ascendente sea el máximo para una determinada velocidad de la banda, obteniendo:

$$U.e_0 = U.\delta - \frac{\rho g}{3\mu}\delta^3 \qquad (2.\ 24)$$

donde:

e_0 Espesor del recubrimiento solidificado, pero en ausencia de chorro acabador (m).

Para hallar el máximo de $U.e_0$:

$$\frac{\partial}{\partial\delta}(U.e_0) = \frac{\partial}{\partial\delta}\left(U.\delta - \frac{\rho g}{3\mu}\delta^3\right) = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow U - \frac{\rho g}{\mu}\delta^2 = 0 \Rightarrow \delta = \left(\frac{\mu.U}{\rho g}\right)^{1/2}$$

y sustituyendo δ en *(2.24)*,

$$e_0 = \delta\left(1 - \frac{\rho g}{3\mu U}\delta^2\right) = \frac{2}{3}\delta \Rightarrow$$

$$e_0 = \frac{2}{3}\left(\frac{\mu.U}{\rho g}\right)^{1/2} \qquad (2.\ 25)$$

La elección entre el perfil B y el C para la región II dependerá de la forma en que el material de recubrimiento sea arrastrado por la banda en la superficie del pote. En general, la velocidad del líquido de recubrimiento será 0 en la superficie libre a menos que algún

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

agente externo imprima velocidad al recubrimiento en la dirección de la banda. Por tanto, el perfil B, que se corresponde con la mínima energía cinética por unidad de masa de recubrimiento, será el que dé la mejor aproximación.

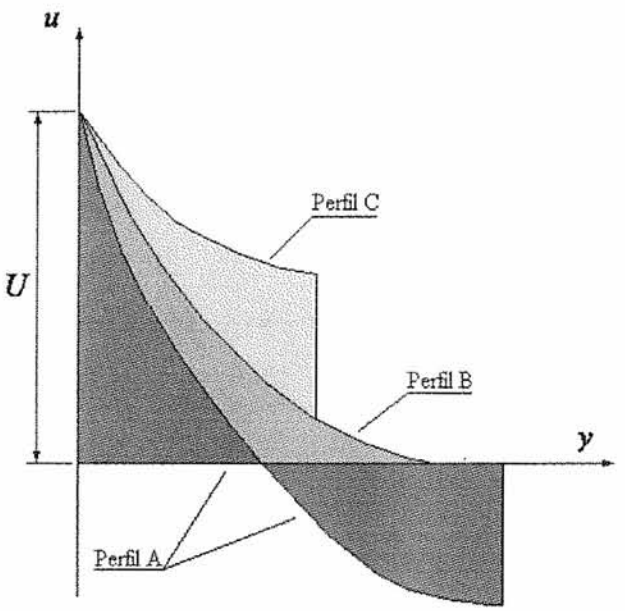

Figura 2. 2 - Diferentes perfiles de velocidad fuera de la región de impacto.

En la *Figura 2.2* se pueden ver los perfiles correspondientes a 4 hipótesis diferentes de flujo de recubrimiento para la región próxima a la zona de impacto del chorro acabador:

- El ***perfil A*** –región II- se corresponde con un flujo característico de la región II, en el que se tienen los dos flujos, el ascendente y el descendente. Se ha dibujado el perfil correspondiente al caso particular en el que el flujo neto es 0.
- El ***perfil B***, también característico de la región II, es un perfil sin velocidades descendentes –ausencia de chorro acabador-. Se ha dibujado el caso particular en el que la velocidad es 0 en la superficie libre.
- El ***perfil C*** , al igual que los anteriores perteneciente a la región II, se distingue responde a la hipótesis de que el flujo neto ascendente sea el máximo para una determinada velocidad de la banda.

2.2.1.4 Flujo de Recubrimiento en la Región de Interacción

En la región III, el impacto del chorro produce un perfil de presión de estancamiento sobre la superficie del recubrimiento. Esta presión de estancamiento produce un gradiente de presión, en la dirección del movimiento de la banda, dentro del material de recubrimiento.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Con las suposiciones hechas en el apartado *2.2.1.2*, el perfil se obtiene de igual forma. La ecuación de Navier-Stokes adopta ahora la forma:

$$\mu \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = \rho g + \frac{\partial p}{\partial x} \qquad (2.\ 26)$$

donde:

p Presión de soplado (N/m2).

Es decir, el efecto del chorro se puede suponer que es equivalente a la adición de una fuerza gravitatoria particular que puede tener uno u otro sentido según se esté en la zona de gradiente positivo, o en la zona de gradiente negativo.

A partir de la ecuación *(2.26)*., y del mismo modo que en caso anterior, se puede obtener la relación que liga el espesor de recubrimiento solidificado con el gradiente máximo del perfil de presión de estancamiento:

$$U.e = \int_{y=0}^{y=\delta} u.dy = U.\delta - \frac{\rho g + \frac{dp}{dx}}{3\mu}\delta^3 \Rightarrow$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 3\mu U \frac{\delta - e}{\delta^3} - \rho g \qquad (2.\ 27)$$

y para el gradiente máximo:

$$\frac{\partial}{\partial \delta}\left(\frac{dp}{dx}\right) = 0 \Rightarrow 3\mu U \frac{\delta^3 - 3\delta^2(\delta - e)}{\delta^6} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow -2\delta + 3e = 0 \Rightarrow \delta = \frac{3}{2}e \qquad (2.\ 28)$$

y sustituyendo:

$$\left.\frac{\partial p}{\partial x}\right|_{MAX} = 3\mu U \frac{1/2.e}{27/8.e} - \rho g = \frac{4}{9}\mu \frac{U}{e^2} - \rho g \qquad (2.\ 29)$$

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

2.2.1.5 Descripción Analítica del Chorro Acabador

Teniendo en cuenta que la ecuación del gradiente máximo, relaciona éste con el espesor final, si se logra desarrollar una expresión que relacione el gradiente con los parámetros fundamentales de operación del chorro acabador. se llegará a relacionar el espesor del recubrimiento con los parámetros básicos de funcionamiento.

Para encontrar dicha expresión se harán las siguientes suposiciones:

- Aunque el flujo de salida de la cuchilla sea laminar, las velocidades son tales que se transforma rápidamente en turbulento a una distancia menor que la distancia cuchilla banda. (<20mm)
- La velocidad en la línea central del chorro corresponde a una relación empírica para chorros turbulentos bidimensionales.
- Si el flujo turbulento está completamente desarrollado, los perfiles de velocidad pueden ser expresados por la teoría de *Tollmien-Goertler*, ver *[Sch87]*, para chorros libres turbulentos.

Teniendo en cuenta las suposiciones anteriores, se puede expresar el perfil de velocidad en la zona de flujo de la forma que sigue:

$$W(z,h) = 2{,}28 W_0 \left(\frac{d}{z}\right)^{1/2} \left[Sech^2\left(\sigma \frac{h}{z}\right)\right] \qquad (2.\ 30)$$

donde:

W	Velocidad del fluido dentro del chorro acabador (m/s).
W_0	Velocidad del chorro a la salida de la cuchilla (m/s).
d	Apertura de los labios de la cuchilla (m)
z	Coordenada auxiliar según el eje del chorro.
h	Coordenada auxiliar, perpendicular al eje del chorro.
σ	Constante relativa al grado de turbulencia en el chorro.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

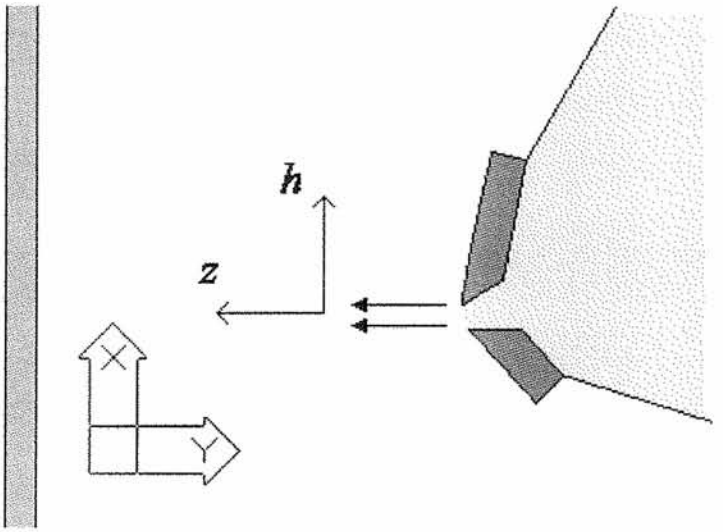

Figura 2. 3 - Ejes principales y auxiliares.

El problema de calcular el perfil de presión de estancamiento, para un chorro turbulento del tipo considerado es sumamente complejo, por lo que se hacen las siguientes suposiciones:

- El perfil de presiones de estancamiento que se desarrolla en la superficie de la banda no es afectado por la alta temperatura de la banda con respecto a la del chorro.
- El chorro incide perpendicularmente a la superficie de la banda.
- Los perfiles de la presión de estancamiento tienen una forma similar, independientemente de la distancia cuchilla-banda.
- El perfil de la presión de estancamiento que se desarrolla en la superficie de la banda, cuando la banda está situada a una distancia z_0 de la cuchilla, es igual al perfil del flujo de cantidad de movimiento que existiría en el chorro a una distancia $\beta.z_0$, donde β es una constante relativa al impacto del chorro sobre la banda ver *[Sch87]*.

Esta última hipótesis permite obtener el valor de $\left.\frac{\partial p}{\partial x}\right|_{MAX}$ en términos de operación de chorro. Teniendo en cuenta que los perfiles son similares, se puede expresar:

$$\left.\frac{\partial p}{\partial x}\right|_{MAX} = \rho_F \left.\frac{\partial W^2}{\partial h}\right|_{MAX} \qquad (2.\ 31)$$

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

donde:

ρ_F Densidad del fluido (aire) acabador (kg/m^3).

Elevando al cuadrado la ecuación *(2.31)* y derivando respecto de *h*:

$$W^2 = 2{,}28^2 . W_0^2 \frac{d}{z}\left[Sech^4\left(\sigma\frac{h}{z}\right)\right] \qquad (2.32)$$

$$\left(W^2\right)' = \frac{\partial W^2}{\partial h} = -4.2{,}28^2 . W_0^2 \frac{\sigma . d}{z^2}\left[Sech^4\left(\sigma\frac{h}{z}\right) Th\left(\sigma\frac{h}{z}\right)\right] \qquad (2.33)$$

Derivando de nuevo e igualando a cero:

$$\left(W^2\right)'' = -4.2{,}28^2 . W_0^2 \frac{\sigma^2 . d}{z^3}\left[4.Sech^4\left(\sigma\frac{h}{z}\right) Th^2\left(\sigma\frac{h}{z}\right) + \frac{Sech^4\left(\sigma\frac{h}{z}\right)}{Ch^4\left(\sigma\frac{h}{z}\right)}\right] = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{1}{Ch^6\left(\sigma\frac{h}{z}\right)}\left[1 - 4.Sh^2\left(\sigma\frac{h}{z}\right)\right] = 0 \Rightarrow Sh^2\left(\sigma\frac{h}{z}\right) = \frac{1}{4} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Ch^2\left(\sigma\frac{h}{z}\right) = \frac{5}{4} \Rightarrow Sech^4\left(\sigma\frac{h}{z}\right) = \frac{16}{25} \Rightarrow Th\left(\sigma\frac{h}{z}\right) = \frac{-1}{\sqrt{5}}$$

Sustituyendo estos valores en *(2.23)*, se tendrá:

$$\left(W^2\right)'\Big|_{MAX} = 4.2{,}28^2 W_0^2 \frac{\sigma . d}{z^2}\left(\frac{16}{25}\frac{1}{\sqrt{5}}\right) \qquad (2.34)$$

Teniendo en cuenta que $z = \beta . z_0$ y que σ tiene aquí un valor de 7,67, ver *[Sch87]*, resulta:

$$\left(W^2\right)'\Big|_{MAX} = \left.\frac{\partial p}{\partial x}\right|_{MX} = 45{,}7\frac{\rho_F . W_0^2 . d}{\beta^2 . z_0^2} \qquad (2.35)$$

donde:

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

z_0 Distancia cuchilla-banda (m).

β Constante relativa al impacto del chorro en la superficie.

El cálculo del parámetro β se realiza tal como se ve en la *Figura 2.4*. A una distancia z_0 el perfil de la presión de estancamiento es el que se muestra con línea discontinua. A esa misma distancia, el perfil del flujo de la cantidad de movimiento será el representado en dicha figura. La distancia cuchilla-banda a la que el perfil del flujo de la cantidad de movimiento sea igual al perfil de la presión de estancamiento a una distancia z_0 es $\beta\, z_0$.

El valor de β debe ser, teóricamente, cercano a 2, ya que es conocido que la presión de estancamiento en un punto es la mitad del flujo de la cantidad de movimiento, y la fuerza total sobre la banda debe de ser igual al flujo total de la cantidad de movimiento.

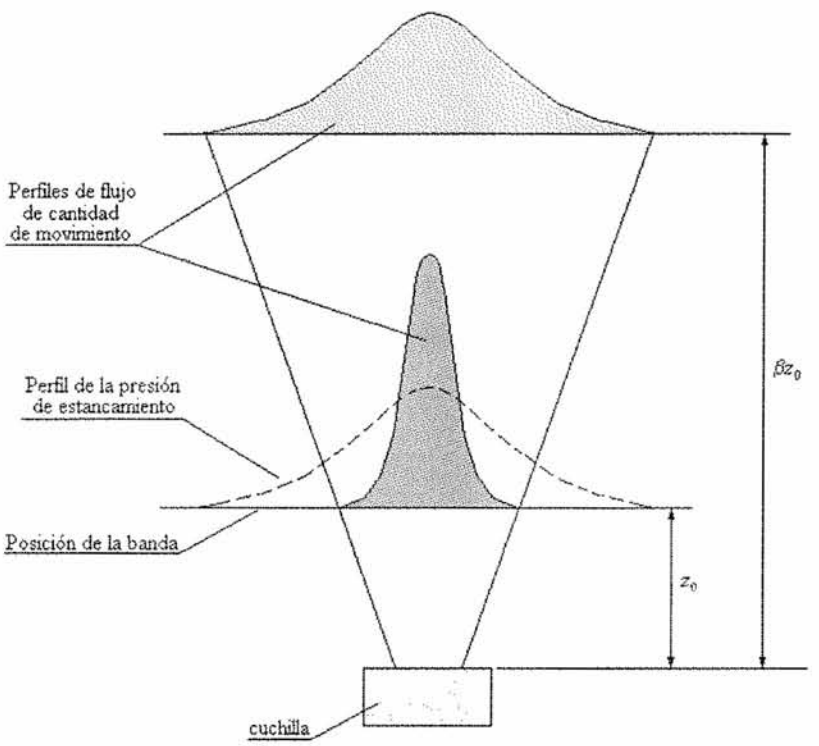

Figura 2. 4 - Obtención del parámetro β.

2.2.1.6 Descripción Analítica del Proceso de Acabado por Chorro de Aire

Tras estudiar de forma separada le flujo de material líquido y el flujo del chorro de aire, se va a proceder a combinar ambos fenómenos. Combinando las ecuaciones *(2.30)* y *(2.35)*, y despreciando el término ρg, por ser un flujo gaseoso y horizontal, se tiene:

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

$$\frac{4}{9}\mu\frac{U}{e^2} = 45.7\frac{\rho_F.W_0^2.d}{\beta^2.z_0^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow e = \frac{1}{10}\beta.z_0\left(\frac{\mu.U}{\rho_F.W_0^2.d}\right)^{1/2} \qquad (2.\ 36)$$

Con lo que se tiene que el espesor final de recubrimiento es directamente proporcional a la distancia cuhilla-banda, a la raíz cuadrada de la velocidad de la banda U, e inversamente proporcional a la raíz cuadrada del flujo de la cantidad de movimiento por unidad de ancho de cuchilla, $\rho_F.W_0^2.d$.

Se puede suponer sin gran error que el fluido se comporta como un gas perfecto, con un valor para la relación entre los calores específicos a presión constante y a volumen constante γ de 1,4.

Si se supone el proceso adiabático, es decir, sin transferencia de calor, se tiene que para un proceso ideal sin fricción entre los estados 1 y 2:

$$\frac{V_1^2}{2} - \frac{V_2^2}{2} = \int_1^2 v.dp \qquad (2.\ 37)$$

Teniendo en cuenta que $p_1.v_1^\gamma = p_2.v_2^\gamma$ resulta :

$$\frac{V_1^2 - V_2^2}{2} = \frac{\gamma}{\gamma - 1}p_1.v_1\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right] \Rightarrow \qquad (2.\ 38)$$

$$\Rightarrow V_1^2 - V_2^2 = \frac{2\gamma}{\gamma - 1}p_1\frac{1}{\rho_1}\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right] \qquad (2.\ 39)$$

En el caso de las cuchillas de aire:

$$V_1 = W_0 \qquad P_1 = P_A$$
$$V_2 = 0 \qquad P_2 = P_0 \qquad (2.\ 40)$$

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

con lo que

$$W_o^2 = \frac{2\gamma}{\gamma - 1} P_A \frac{1}{\rho_F} \left[\left(\frac{P_0}{P_A} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$$

con lo que el valor $\rho_F . W_0^2 . d$ se puede expresar por:

$$\rho_F . W_0^2 . d = d . \frac{2\gamma}{\gamma - 1} p_A \left[\left(\frac{p_0}{p_A} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$$

y suponiendo un rendimiento del chorro η se obtiene:

$$\rho_F . W_0^2 . d = \eta . d . \frac{2\gamma}{\gamma - 1} p_A \left[\left(\frac{p_0}{p_A} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \qquad (2.41)$$

y combinando las ecuaciones *(2.36)* y *(2.41)* resulta el espesor final de recubrimiento en función de los parámetros de operación del chorro:

$$e = \frac{1}{10} \beta . z_0 . \left(\frac{\mu . U . (\gamma - 1)}{2\eta . p_A . \gamma . d} \right)^{1/2} \left[\left(\frac{p_0}{p_A} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]^{-1/2} \qquad (2.42)$$

2.2.2 Limitaciones del Modelo

La descripción analítica del proceso de recubrimiento anteriormente mostrado presenta serias limitaciones debido, principalmente, a las simplificaciones asumidas como válidas:

1. El modelo supone la viscosidad del zinc es constante, por lo que es evidente que dicho modelo no tiene en cuenta el efecto de las variaciones de la temperatura de la banda (aunque es aceptable asumir que la temperatura de la banda a la salida del baño es la misma que la del propio baño, ver *[Dav95]*), ni el efecto de disminución de la temperatura debido a la interacción del chorro acabador. Esto implicaría que

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

el zinc no se solidificase, y que el comportamiento de las regiones II y IV debería ser idéntico.

2. El modelo desacopla las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento de las ecuaciones de conservación de la energía. Al ser la viscosidad dependiente de la temperatura no es correcto desacoplar la temperatura (incluida en las ecuaciones de energía) de la viscosidad (incluida en las ecuaciones de cantidad de movimiento).

3. El modelo supone que el chorro acabador sólo afecta a la zona de impacto, con lo que se desprecian los efectos en las zonas próximas. Sin embargo, el impacto del chorro provoca un desplazamiento del fluido de zinc hacia zonas próximas a la de impacto. Debido a esto, la influencia del chorro sobre la región II no es despreciable, ya que aumenta la masa de zinc depositada en dicha región.

4. Al relacionar espesor de recubrimiento y presión de soplado, ver ecuación *(2.27)*, la integral se resuelve entre el origen y el valor del espesor de recubrimiento tras el impacto del chorro de aire. En el momento del impacto del chorro de aire, el espesor de recubrimiento sería el resultante del deslizamiento del zinc caliente sobre la banda sin mediar la intervención de las cuchillas. Como el modelo no realiza ningún estudio sobre el comportamiento del sistema sin la actuación de la cuchilla de aire, se ve obligado a no considerar la zona del zinc que es arrastrada por la acción de la cuchilla, lo que supone una importante simplificación.

5. El chorro acabador está considerado como un fluido perfecto y turbulento a la hora de deducir la ecuación de la velocidad en el núcleo del chorro. Sin embargo, posteriormente, en el momento de relacionar la velocidad con la presión, se asume como cierto, el comportamiento adiabático de dicho gas. Esta hipótesis sería cierta sólo en el caso de que el fluido fuera compresible.

A la vista de estas limitaciones, podría pensarse que el modelo aquí referido no se ajusta a la realidad, sin embargo parece haberse demostrado que la desviación existente entre los resultados obtenidos mediante este modelo, y los recogidos de líneas de galvanizado, tanto reales como maquetas, es bastante pequeña *[Tho76]*.

Por otro lado, parece evidente que ante tales limitaciones los resultados no deberían ser excesivamente buenos. Esta contradicción podría ser explicable habida cuenta del número de variables empíricas que el modelo incluye, y que pueden ser ajustadas para obtener un

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

resultado aceptable. Por otro lado, el sistema considerado presenta la característica de que incluso ante variaciones altas de la entrada (posición de las cuchillas), la salida (recubrimiento obtenido) se mantiene dentro de márgenes de variación muy acotados, por lo que los errores que podría generar el modelo matemático en ningún caso serían excesivos.

Una solución a estas limitaciones pasaría por considerar tres zonas en lugar de seis como se estaba considerando. Estas tres zonas serían:

1. Desde el pote de salida hasta que no tiene curvatura.(Zona I en el modelo anterior)
2. Desde la zona I hasta la zona VI
3. De la zona VI en adelante.

La zona I se encuentra perfectamente estudiada en *[Sze88]*, por lo que se conocería el espesor inicial de la zona 2 así como la velocidad y la temperatura.

En la zona 2 se tendría las siguientes fronteras:

- **Frontera inicial**: es la frontera inferior y coincide con la frontera superior de la zona 1. Se suponen conocidas todas las condiciones frontera necesarias para el estudio de esta zona.
- **Frontera de chapa:** la velocidad en esta frontera será la de la banda, al igual que la temperatura.
- **Frontera superior:** es la frontera en la que se tiene el recubrimiento deseado. La velocidad del zinc es cero respecto a la banda y la temperatura es conocida.
- **Frontera libre:** es la frontera que está en contacto con el aire y con el chorro acabador. De esta zona se conoce que la derivada normal de la velocidad es nula, y sería necesaria otra condición para tener definido correctamente el problema. Esta condición viene dada por la fuerza ejercida sobre la frontera libre.

Suponiendo que el problema es estacionario, la componente tangencial de la fuerza debe ser nula (en caso contrario la frontera libre tendría movimiento). La componente normal de la fuerza es la fuerza ejercida por el chorro (que se supone conocida si el problema del chorro está resuelto) si el elemento considerado está en la zona de impacto; y será la presión atmosférica si el elemento está fuera de la zona de impacto. Esta fuerza es constante en cada punto, y es continua a lo largo de la banda.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Además es necesario tener en cuenta tanto la curvatura del recubrimiento como la tensión superficial, por lo que la condición a imponer es:

$$F_n|_{\text{frontera libre}} = F_{\text{chorro}} + 2\sigma_S H \qquad (2.43)$$

donde:

H	Curvatura media gaussiana
σ_S	Tensión superficial

El inconveniente que este método presenta, además de su mayor complejidad, es que para poder resolverlo, es necesario tener un dominio inicial; es decir una aproximación de la frontera libre.

2.3 Otras Aproximaciones

Además del modelo aquí comentado, es posible encontrar diferentes modelos que intentan modelar el proceso de recubrimiento de la línea de galvanizado. A continuación se comentan algunos de los más importantes:

2.3.1 Modelo de Malmedier

En el artículo publicado por Marc Malmedier *[Mal98]* se realiza un estudio sobre el efecto de introducir campos magnéticos en lugar de las cuchillas de aire que se utilizan en la actualidad. Este modelo asume que la fuerza tangencial necesaria, para conseguir un determinado espesor viene dada por:

$$F_x = \frac{2}{9} 10^6 \frac{\mu U \rho^2}{q^2} - \rho_z g \qquad (2.44)$$

donde q es el peso de recubrimiento final (g/m^2).

La expresión *(2.44)* ha sido extraída del modelo de Thornton *[Tho76]*, por ello todas las críticas aplicables al modelo de Thornton, son aplicables a este.

2.3.2 Modelo de Lloyd Jones

Al igual que Malmedier, C. Lloyd Jones, *[Lloy98]*, realiza un estudio sobre la introducción de campos magnéticos en la línea de galvanizado. Utiliza como trabajo *[Tho76]*, por lo que

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

la fuerza tangencial es la misma, y las críticas son, a su vez, las mismas que para este modelo.

2.3.3 Modelo de Szekely

Julian Szekely, *[Sze88]*, realiza estudios sobre el problema de la extracción de cuerpos sólidos sumergidos en líquidos, y sobre el efecto de la incidencia de un chorro de gas sobre una superficie liquida.

Extracción de un Cuerpo Sólido Sumergido en un Líquido

Para resolver el problema de la extracción de cuerpos sólidos divide el problema en tres regiones:

En la región superior, a cierta distancia del seno del líquido, el flujo es paralelo y el efecto de la curvatura del líquido es despreciable. Por lo que considera que en esta región el comportamiento del fluido viene dado por la ecuación:

$$\rho g_x = -\mu \frac{d^2 u_x}{dy^2}, \qquad 0 \le y \le h \tag{2. 45}$$

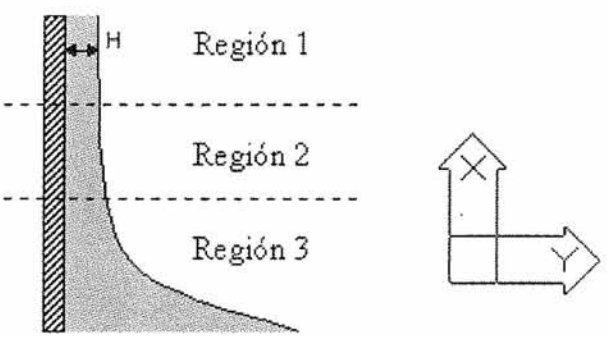

Figura 2. 5 – Esquema de la división en tres regiones de Szekely.

En la región 3, predominan los efectos de curvatura. El menisco de un líquido en contacto con una placa vertical se obtiene minimizando la energía superficial del sistema

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

$$\frac{\frac{d^2h}{dx^2}}{\left[1+(\frac{dh}{dx})^2\right]^{3/2}} = \frac{\rho g_x x}{\sigma} \qquad (2.46)$$

donde σ_S es la tensión interfacial. La solución de la anterior ecuación diferencial sirve para calcular la forma de la superficie líquida en la región 3.

En la región 2 se debe considerar tanto el efecto de la curvatura como el del flujo. Las suposiciones que realiza para calcular el flujo son:

1. Al ser la capa delgada, sólo se tiene en cuenta la componente x de la ecuación de movimiento
2. Se supone que la velocidad en la dirección es nula.

La ecuación del movimiento en esta zona es:

$$\mu\frac{d^2u_x}{dy^2} + \rho g - \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \qquad (2.47)$$

En contraste con el comportamiento de capas delgadas en flujo paralelo, el gradiente de presión no es cero en este caso. Este gradiente de presión es producido por la curvatura de la superficie y puede escribirse como:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \sigma\frac{\partial^3 h}{\partial x^3} \qquad (2.48)$$

Sustituyendo el gradiente de presión en la ecuación del movimiento se tiene:

$$\mu\frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \rho g_x + \sigma\frac{\partial^3 h}{\partial x^3} = 0 \qquad (2.49)$$

la cual con

$$u_x = U_{x,0} \quad \text{en y} = 0 \qquad (2.50)$$

donde $U_{x,0}$ es la velocidad de la placa, y

$$\frac{\partial u_x}{\partial y} = 0 \quad \text{en y} = h_0(x) \qquad (2.51)$$

define la región 2.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

El enunciado del problema se complementa entonces expresando la continuidad entre las regiones 1 y 2.

El sistema de ecuaciones que se ha obtenido se resuelve numéricamente para las condiciones adecuadas a la frontera sobre h. Tallmadge, *[Tal65]*, demostró que existen dos soluciones asintóticas convenientes. Para valores pequeños del número capilar $N_{Ca}=U_{x,0}\mu/\sigma$, se tiene:

$$h = 0.95\left[\frac{\mu^2 U_{x,o}^2}{\sqrt{\sigma}(\rho g)^{3/2}}\right]^{1/3} \qquad (2.\ 52)$$

mientras que para valores grandes de N_{Ca} la siguiente solución es válida:

$$h = \sqrt{\frac{\mu U_{x,o}}{\rho g}} \qquad (2.\ 53)$$

La primera solución sería válida para fluidos viscosos hasta velocidades de extracción de 0,5 m/s.

La segunda solución, que sería correcta para velocidades de extracción superiores a 0,5 m/sg, coincide salvo constantes, con la propuesta por Thornton *[Tho76]*, que venía dada por:

$$h = \frac{10^6}{3}\sqrt{\frac{2\mu U_{x,0}}{\rho g}} \qquad (2.\ 54)$$

Chorros que Inciden sobre Superficies Líquidas

Szekely hace referencia a los trabajos llevados a cabo por Bradshaw y Wakelin *[Bra67]*, así como por Sharma y colaboradores, *[Sha77]*.

Sharma relaciona la cantidad de movimiento del chorro, con la distancia entre la boquilla y la superficie libre y con la profundidad de la depresión mediante la expresión:

$$\frac{H_c}{H_0}\left(\frac{H_0 + H_c}{H_0}\right)^2 = \frac{154 P_j}{2\Pi g \rho_l H_0^3} \qquad (2.\ 55)$$

donde

H_c Profundidad de la depresión (m).

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

H_0 Distancia de la boquilla al líquido (m).

P_j Cantidad de movimiento del chorro.

ρ_l Densidad del líquido (Kg/m^3)

2.3.3.1 Críticas al Modelo de Szekely

Szekely supone que se puede considerar el movimiento en la región 2 sólo en la dirección *x*, no considerando la dirección *y* que es precisamente la dirección que interesa en este caso particular.

El modelo no tiene en cuenta el efecto de la temperatura, ni la ecuación de la energía, que en el problema de galvanizado juegan un importante papel.

El modelo supone que la región 1 es paralela al eje x. En el problema de galvanizado se intenta calcular la fuerza tangencial que es necesario suministrar mediante las cuchillas de aire para conseguir que la región 1 sea paralela al eje *x*. Por lo tanto si se acepta la suposición que realiza Szekely, no sería necesario introducir las cuchillas de aire, conclusión obviamente errónea.

Por otro lado, respecto al modelo del chorro, no se tiene en cuenta si la velocidad es supersónica o subsónica, si el fluido es compresible o incompresible, la tensión superficial del líquido, así como las propiedades físicas del fluido que compone el chorro.

2.3.4 Modelos de Elementos Finitos

Si se considera el problema de galvanizado dentro del marco del método de los elementos finitos (FEM), aparece lo que se denomina un problema de frontera libre.

Existen numerosos métodos para resolver problemas con frontera libre. Se puede considerar tres formas distintas de afrontar el problema:

- Considerar el mallado fijo y desarrollar ciertas técnicas especiales para trasladar la frontera libre.
- Considerar un mallado que se pueda deformar y realizar un ciclo iterativo con los siguientes pasos:
    1. Se supone una frontera inicial dada.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

2. Se resuelve el campo de flujo dentro del dominio fijo anterior, negando una de las condiciones frontera.
3. La frontera libre se calcula imponiendo la condición frontera negada en el paso b)
4. Se repite el anterior ciclo hasta tener una convergencia con una tolerancia determinada.

- Se considera un mallado deformable pero se elimina la iteración entre la posición de la superficie libre y las variables de campo introduciendo la posición de los nodos sobre la superficie libre directamente como grados de libertad. Esto nos conduce a un sistema acoplado, que se resuelve mediante el método de Newton-Raphson y que nos calcula simultáneamente la posición de la superficie libre y el campo de las variables en las nuevas posiciones nodales.

Este tercer método es utilizado por M.S.Engelman *[Eng97]*, para resolver el problema de la simulación del flujo de fluidos incompresibles con una superficie libre/en movimiento.

Este autor propone la resolución de la ecuación de la ecuación de conservación de la masa, así como la de la conservación del momento para fluidos newtonianos incompresibles estacionarios:

$$\text{Momento} \qquad \rho u_j u_{i,j} = -p_{,i} + \bar{f}_i + \mu(u_{i,j} + u_{j,i})_{,j} \tag{2.56}$$

$$\text{Masa} \qquad u_{i,j} = 0 \tag{2.57}$$

Junto con las condiciones frontera:

1. La velocidad del fluido es igual a la de la banda, sobre la banda
2. La velocidad en las paredes del pote son nulas

E imponiendo en la superficie libre las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned} u_n &= 0 \\ f_n + p_0 &= 2\sigma H \\ f_t &= 0 \end{aligned} \tag{2.58}$$

donde:

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

u_n	Componente normal de la velocidad.
f_n, f_t	Componentes normales y tangenciales respectivamente del vector de tensiones en la superficie.
p_0	Presión exterior.

Engelman explica cómo realizar una discretización del problema y resolver las anteriores ecuaciones mediante un método iterativo cuasi.Newton.

2.3.4.1 Inconvenientes de los Modelos de Elementos Finitos

El método que considera un mallado fijo presenta el inconveniente de tener que incluir la adición de detalles numéricos a través de una región mucho más grande que el dominio de interés. Además sólo permite la localización de la frontera dentro de un determinado elemento pero no su forma real.

El segundo método tiene el inconveniente de resultar muy costoso numéricamente, además de no poder garantizarse la convergencia a la solución.

El tercer método resulta, también, muy costoso. Además, la matriz del sistema que se necesita resolver para hallar la solución esta mal condicionada, lo que obliga a buscar un planteamiento adimensional adecuado al problema.

Aunque Engelman no considera la dependencia de las propiedades del fluido respecto de la temperatura, se podría generalizar su método incluyendo la ecuación de la energía en el problema. En ese caso podríamos resolver el problema bien con un acoplamiento de las tres ecuaciones (masa, momento, energía), bien considerando una condición inicial de temperatura y resolviendo a partir de ella las ecuaciones de la masa y el momento. A partir de la solución de las anteriores ecuaciones se calcula una nueva temperatura y así, sucesivamente, hasta tener la convergencia deseada.

2.3.5 Métodos Multifase (VOF)

Los métodos multifase se utilizan cuando se encuentran presentes dos o más fluidos en el problema. El método VOF resulta apropiado cuando los fluidos que se están considerando no son miscibles.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Este método consiste en distinguir los dos líquidos mediante la introducción de una variable: la fracción de volumen de la fase sobre un elemento. En cada volumen de control, la fracción de volumen de todas las fases suma la unidad. Los campos de todas las variables así como sus propiedades son llevados a través de todo el dominio mediante la fracción de volumen.

La variable fracción de volumen puede tomar los valores:

1. α_q=0 si el elemento está vacío (del fluido q)
2. α_q=1 si el elemento está lleno (del fluido q)
3. 0<α_q<1 si el elemento contiene la frontera entre los dos fluidos.

La posición de la frontera entre las fases viene dada por la solución de la ecuación de la continuidad de la ecuación de la fracción de volumen de la segunda fase:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_q}{\partial x_i} = 0 \qquad (2.\ 59)$$

La fracción de volumen de la primera fase viene dada por:

$$\alpha_1 = 1 - \alpha_q \qquad (2.\ 60)$$

Las propiedades de los fluidos, por ejemplo la densidad, se calculan mediante la ecuación:

$$\rho = \alpha_q \rho_q + (1 - \alpha_q)\rho_1 \qquad (2.\ 61)$$

donde q representa la segunda fase y 1 la primera fase.

Por otro lado, la ecuación de continuidad de las fases se resuelve la ecuación del movimiento:

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho u_j + \frac{\partial}{\partial x_i}\rho u_i u_j = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i}\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) + \rho g_j + F_j \qquad (2.\ 62)$$

Además habría que resolver la ecuación de la energía, si se desea tener en cuenta el acoplamiento térmico producido por las propiedades.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

2.3.5.1 Inconvenientes del Modelo VOF

En los casos donde existen grandes diferencias entre las velocidades de las fases, la convergencia de las velocidades computadas cerca de la frontera puede verse adversamente afectada.

2.4 Modelado Avanzado

La difusión de los modelos basados en técnicas de inteligencia artificial comienza a partir de campos tan poco relacionados con la industria del acero como pueden ser la econometría y las ciencias sociales.

Los cuatro líneas principales de investigación referidas a modelos basados en inteligencia artificial son:

- Sistemas basados en reglas (sistemas expertos).
- Sistemas borrosos (*Fuzzy Sets*).
- Computación evolutiva.
- Redes neuronales.

De todos ellos, los primeros en desarrollarse fueron los sistemas expertos, pero ante el elevado número de variables que debían ser consideradas en un modelo de este tipo, y dada la dificultad de obtener el conocimiento, este método se encuentra hoy en día en franca regresión. Curiosamente, las mismas causas que han hecho retroceder a los sistemas expertos, son los que han propiciado el auge de los sistemas basados en redes neuronales.

Estos sistemas son capaces de manejar un elevado número de variables, y no es especialmente necesario poseer ningún tipo de conocimiento sobre el problema propiamente dicho, aunque sí conveniente.

2.4.1 Aplicación de Técnicas Inteligentes de Modelado a la Industria del Acero.

La gran demanda por parte de la industria siderúrgica de modelos capaces de adaptarse a sus procesos con gran exactitud *[Gon99]*, así como el gran interés despertado en el seno de la Comunidad Europea por la utilización de los métodos de computación neuronal ha dado como resultado un gran incremento en el número de los proyectos de investigación que

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

utilizan estas técnicas *[Ort96]*. Algunos de ellos son comentados a continuación sin entrar en detalle en los algoritmos utilizados.

- **Hornos**

  Distribución de la temperatura en la pared de un horno: (Kobe, Japón) La medida de la temperatura se realiza mediante la toma de datos en múltiples puntos. Cuando la distribución de la temperatura se realiza en dos direcciones resulta difícil para los expertos reconocer patrones de distribución. Una red de aprendizaje no supervisado fue utilizada para extraer los patrones. Después de entrenada la red, fue utilizada para clasificar patrones en 25 tipos diferentes. *[Sin95]*.

  Predicción de la tasa de coke en un horno: (Bhilai Steel Plant, India). La predicción está basada en los datos de operación diarios y mensuales. Sólo se consideraron los periodos estables de operación. Los periodos inestables fueron identificados y filtrados mediante una red neuronal. Otra red de tres capas (9-9-1), con algoritmo de back-propagation fue utilizada para la predicción. *[Sin95]*.

- **Trenes de Laminación por Rodillos**

  Sistema de Control en Tiempo Real Basado en Redes Neuronales en el Procesamiento del Acero: (Alemania). Para el modelado y control de sistemas no lineales y variantes en el tiempo, las redes neuronales están particularmente capacitadas. Como resultado de este sistema, la producción de acero resulta más económica, y la productividad ha sido mejorada. *[Sör98]*.

  Sistema de "Presets" de Fuerzas para el Procesado de utilizando Redes neuronales y Técnicas Estadísticas: (España). Esta combinación de técnicas ha dado como resultado una mejora en los errores de dimensionamiento. El modelo está estructurado en dos niveles: una primera aproximación basada en la clasificación y proyección. Y un segundo nivel que produce un valor numérico para las variables espesor y ancho. *[Ort98]*.

  Simulación Integrada de un Tren de Laminación y su Aplicación en el Control del Proceso Mediante Inteligencia Artificial: (Suecia). La experiencia indica que el método de los elementos finitos (FEM) puede ser utilizado para predecir el comportamiento del material a su paso por los rodillos de laminación. Sin embargo, este método es

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

demasiado lento para su funcionamiento "*on-line*". Los resultados del método FEM, se han utilizado para entrenar una red neuronal. Dicha red proporciona los mismos resultados que el método de los elementos finitos en mucho menor tiempo. *[Lev98].*

Predicción de la Planitud de una Chapa Laminada en Frío en un Tren de 20 rodillos Mediante Técnicas de Redes Neuronales. (Italia). Se desarrollan algoritmos susceptibles de predecir la planitud de las chapas de acero laminadas en un tren de laminación multirodillo. *[Lub98].*

Redes Neuronales Artificiales para un Modelo de "presets" en un Tren Temper: (Francia). En este estudio, las técnicas de inteligencia artificial proporcionan una herramienta muy interesante, adaptada para resolver problemas de modelo complejo de funciones en un espacio multidimensional. *[Pic98].*

- **Colada Continua**

Sistema de Predicción de Fallos en Colada Continua: (Nippon Steel, Japón). Nippon Steel ha desarrollado un sistema que ha reducido los costes en varios millones de dólares al año. El sistema utiliza un red feedforward entrenada con el algoritmo de backpropagation para detectar fallos antes que estos ocurran. *[Asa93], [Tan97].*

Análisis y Monitorización de la Colada Continua Mediante Mapas autoorganizados: (Helsinki). La formación de defectos comienza en muchos casos en el molde. El comportamiento dinámico del sistema puede ser analizado la información térmica del molde. Los mapas autoorganizados (SOM) son un potente método de redes neuronales para el análisis del proceso y su visualización. *[Lai98].*

Predicción de la Calidad Superficial de Slabs de Acero Inoxidable mediante la utilización de Redes neuronales: (Italia). Este sistema está basado la medida de la temperatura mediante termopares. El resultado muestra que esta herramienta posee unas características comparables con respecto de las tradicionales herramientas de predicción (estadística, física). *[Bel98].*

- **Hornos de Arco Eléctrico**

Control de un Horno de Arco Eléctrico: (USA). Neural Applications Co. Y Siemens han desarrollado un sistema para el control de hornos de arco eléctrico basado en redes

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

neuronales. Este sistema reduce los costes de electricidad y aumenta la productividad. El sistema se encuentra en uso en Singapur y en Alemania. *[Sta92]* y *[Pop94]*.

- **Control de Calidad**

  Detección de los Defectos Superficiales Utilizando Redes Neuronales: (Nippon Steel, Japón). Desarrollo de una aplicación basada en redes neuronales para la detección de defectos. La red neuronal consistió en unas redes locales, y una red global por encima de las redes locales. El método de aprendizaje fue el del perceptrón. *[Tan97]*.

  Predicción de la Calidad Mediante Métodos Basados en Datos: (Alemania). Para este estudio se han utilizado 94 variables, correspondientes a 4252 slabs, incluyen variables químicas, variables de proceso y variables de la planta. Para este proyecto se utilizó la topología del perceptrón multicapa. *[Lin98]*.

- **Metalurgia**

  Modelo de Redes Neuronales para la Corrosión del Acero al Carbono: (Brisbane, Australia). Las características de este modelo fueron validadas contra una base de datos de considerable tamaño, y ha demostrado unas capacidades de interpolación muy superiores a otros modelos semi-empíricos bien conocidos. *[Nes97]*.

Con el fin de conocer con mayor profundidad este tipo de modelos, se comentan a continuación dos proyectos, indicando con un mayor detalle el tipo de técnicas utilizadas.

2.4.2 Modelo para un Tren de Laminación de Chapa

Se pretende una optimización de los modelos matemáticos de laminación de un tren de chapa, existiendo, para ello, cuatro modelos: temperatura, fuerza, par y forma.

Estos modelos matemáticos conforman los ajustes para la precisión en la fabricación de las chapas requeridas.

Para su optimización se han empleado técnicas de inteligencia artificial (IA) tales como Redes Neuronales y Estrategias Evolutivas

Los cuatro modelos (temperatura, fuerza, par y forma) están basados actualmente en expresiones matemáticas con constantes empíricas. El proyecto inicial se descompuso en

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

tres subproyectos, que siguen un camino paralelo de actuación: optimizar las constantes empíricas de los modelos en temperatura, forma y fuerza/par

Para el estudio se instaló en la factoría un sistema de adquisición de datos que recogía los valores de las variables de proceso. Los datos obtenidos fueron tratados de formas diferentes.

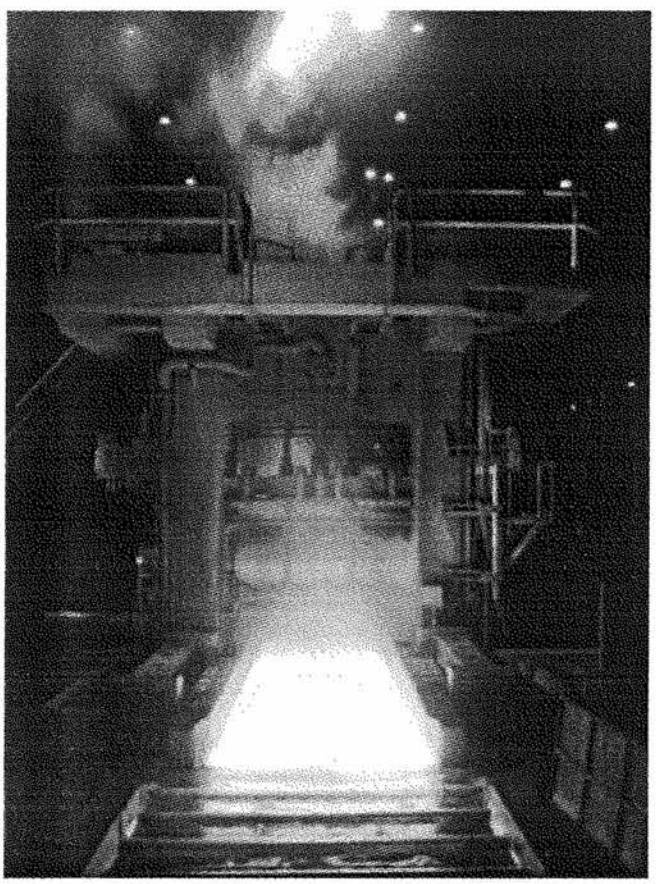

Figura 2. 6 - Tren de chapa gruesa.

Para cada modelo matemático, con sus correspondientes factores y constantes:

1. Se buscó un nuevo conjunto de valores para las constantes empíricas utilizando Estrategias Evolutivas. Para ello se dispuso una población inicial de individuos, cada individuo formado por un conjunto de valores para las constantes empíricas. Aplicando mutaciones normalmente distribuidas, los individuos fueron cambiando generación tras generación, sobreviviendo sólo los mejores y convergiendo hacia

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

la solución. El resultado es un nuevo conjunto de constantes que minimizan los errores de predicción.

2. Por otro lado se utilizó un modelo de caja negra utilizando Redes Neuronales, donde las entradas estaban formadas por el conjunto de variables implicadas en el proceso de laminación.

Estos modelos pueden se encuentran completamente definidos en *[Fue99]*, el modelo de fuerzas, y en *[Fin99]*, el modelo de temperaturas.

2.4.3 Modelo del Espesor de recubrimiento de Estaño para una Línea de Hojalata.

Las líneas de producción de hojalata, son instalaciones automatizadas pero en las que el control del proceso se realiza de forma manual por los operarios de la planta. A la nave llegan bobinas que son en sucesivas fases: debobinadas, soldadas, aplanadas, limpiadas, decapadas, estañadas, tratadas químicamente, aceitadas y posteriormente bobinadas de nuevo. El estañado se realiza de forma continua sobre la banda que circula a una velocidad entre 100 y 400 m/min. Las operaciones anteriores al estañado adaptan las bobinas de entrada a las condiciones exigidas para el correcto estañado. Las etapas posteriores representan tratamientos ulteriores para preservar la calidad de la bobina obtenida. La etapa más interesante es el estañado.

El estaño es depositado sobre la banda mediante un proceso electrolítico: la banda de acero entra en las cubas de la unidad, en las que se encuentra una disolución conductora (electrolito), que contiene principalmente iones de estaño (Sn^{2+}).

Por medio de rectificadores se establece un campo eléctrico en ese electrolito, lo que motiva que estos iones positivos (cationes) se dirijan al polo negativo (cátodo), en donde ganan electrones, transformándose en átomos que van recubriendo dicho polo. Lógicamente pues, la banda actuará siempre como cátodo.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

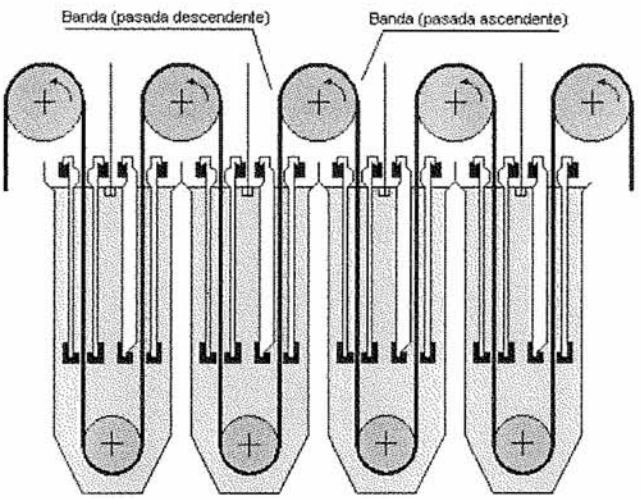

Figura 2. 7 - Esquema de funcionamiento de una línea de hojalata electrolítica.

La línea cuenta con un cierto número de rectificadores –entre 15 y 20 generalmente- para cada una de las caras de la banda. Los rectificadores son ajustados por los operarios para cada banda en función de su estado operacional y del recubrimiento que se desea. La línea produce un número discreto de recubrimiento, por lo que los ajustes se basan en unas tablas calculadas en función de la ley de Faraday.

Pero en la práctica de la línea las condiciones ideales - cantidad de sustancia depositada en el cátodo, por electrólisis, es directamente proporcional a la cantidad de electricidad que ha atravesado el electrolito y al número de equivalentes-gramo- no se reproducen debido a la presencia de otras sustancias en la solución que se depositan sobre la banda y a los errores de medida de los sensores.

En la línea se introduce un coeficiente corrector multiplicativo del recubrimiento esperado que oscila entre 0.94 y 0.99.

El diseño de un modelo que permita conocer el recubrimiento que se consigue ante unas determinadas condiciones de la línea permitiría que los ajustes de los operarios fueran mucho más finos. En la actualidad sólo se producen ajustes en función de los datos de recubrimiento que se realizan posteriormente en laboratorio.

La práctica de los tecnólogos de la línea refleja otra serie de factores como la concentración de Sn2+, la acidez de la solución, la temperatura del electrolito, la velocidad de recirculación como factores que influían en el espesor del recubrimiento.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Los estudios que intentaron mejorar el modelo físico introduciendo nuevos parámetros en la ley de Faraday fracasaron. Se hizo necesario adoptar un nuevo enfoque, que permita reflejar la realidad de la línea a partir de los datos directos de esta.

Aplicando la fórmula utilizada actualmente en la línea (con los factores correctivos), se obtiene un índice de acierto (considerando aciertos un error absoluto menor de 0,1) del 30 al 35%. Si se intenta encontrar una fórmula no lineal mediante una red de perceptrones dotada de una capa intermedia de 7 neuronas, este resultado se mejora hasta un 83% de aciertos. Introduciendo valores de concentraciones de iones de estaño y de otras substancias, introducidas en la cuba para mantener la acidez, se mejora el índice de aciertos hasta el 90%.

2.5 Conclusiones

El soplado mediante cuchillas de aire es el sistema de control de espesor de recubrimiento más generalizado en las líneas de galvanizado continuo .

El modelo clásico más relevante es el desarrollado por Thornton y Graff *[Tho76]*. El modelo físico se basa en las ecuaciones de conservación de la masa, de la cantidad de movimiento, y de la energía. Este modelo, como todos los modelos físicos que se encontraron relativos a este caso, es bidimensional. Thornton y Graff dividen las zona de estudio en cuatro y realizan una serie de hipótesis que simplican la resolución del problema. Pero el uso de estas hipótesis, al mismo tiempo que facilitan la resolución de las ecuaciones conllevan simplificaciones y errores. El suponer que la viscosidad es constante con la temperatura, el no considerar la zona de recubrimiento eliminada por el chorro de aire dentro de los límites de integración, entre otros, son los errores detectados en este modelo.

El modelo físico se aproxima bastante a la realidad ya que las simplificaciones suponen errores no muy importantes. A este acercamiento a la realidad colabora la posibilidad de adecuar las constantes de las ecuaciones a las condiciones reales de operación de la línea.

Este modelo es ampliado por otros autores como Malmedier y Lloyds Jones, centrándose sobre todo en el control de recubrimiento por campos magnéticos.

Szekely estudia dos problemas íntimamente relacionados con el modelo físico del control de recubrimiento, la extracción de cuerpos solidos de líquidos (salida de la banda del pote), y la incidencia de chorros de gas en líquidos (acción de las cuchillas de aire). Su aproximación,

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

aunque pueda ser válida es otros casos, presenta limitaciones muy importante al caso presente en el que es más relevante la cantidad de líquido que permanece en la banda que lo que ocurre con el que se desliza.

Otra aproximación es el uso del método de elementos finitos o el metódo multifase (VOF). Más relevantes son los trabajos realizados con el primero, pero en general los resultados adolecen de una excesiva complejidad en la resolución.

Como alternativa a las técnicas de modelado ya presentadas, se presentan técnicas que intentan extraer información sobre el proceso a partir de datos del mismo proceso. Con estas técnicas es posible realizar una reingeniería del proceso. Comprenden sistemas expertos, modelos borrosos, computación evolutiva y redes neuronales. Se presentan casos exitosos de uso de estas técnicas en siderurgía, incluso en problemas de control de recubrimiento, que avalan los buenos resultados conseguidos con su aplicación y justifican su adecuación para la consecución de un modelo del sistema de control aquí tratado.

Queda patente pues, que dada la gran complejidad de los fenómenos físicos que acontecen en un sistema como el descrito en este trabajo, se hace sumamente complejo el desarrollo de un modelo analítico que tome en consideración todos y cada uno de estos fenómenos. Por otro lado, los modelos más asequibles adolecen, como se ha demostrado, de importantes limitaciones e inexactitudes.

El modelado analítico exige una serie de simplificaciones y la medida de valores muchas veces difíciles de conocer mediante ensayos, por lo que sus resultados son limitados

Es aquí donde los sistemas inteligentes, capaces de tomar en consideración diversos fenómenos y diferentes situaciones, tienen cabida. La modelización basada en datos, mediante caja negra, evita el conocimiento exacto de las interioridades del modelo, produciendo ajustes de acuerdo con las condiciones del modelo

Situaciones tales como el desgaste de la línea, el reconocimiento de patrones de ruido subyacentes, o dar respuesta adecuada a datos que nunca antes se habían presentado, son fácilmente resolubles mediante técnicas de redes neuronales.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Capítulo 3

Técnicas Empleadas

3.1 Introducción *80*

3.2 Métodos de Selección de Variables *80*
3.2.1 Algoritmo Univariante 81
3.2.2 Algoritmo del Análisis de la Covarianza Múltiple 84
3.2.3 Algoritmo Mínimo Error 86
3.2.4 Splines Regresivos Multivariantes Adaptativos – (MARS) 87

3.3 Métodos de Proyección *90*
3.3.1 Generalidades 90
3.3.2 Proyección de Sammon 92

3.4 Redes Neuronales *94*
3.4.1 Introducción a la Computación Neuronal 94
3.4.2 Ventajas del Uso de Redes Neuronales 96
3.4.3 Evolución Histórica 97
3.4.4 Modelos de Redes Neuronales 99
3.4.5 Evaluación de la Utilización Práctica de las Redes Neuronales 103

3.5 Conclusiones *106*

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

3.1 Introducción

Para realizar un modelo utilizando técnicas de tratamiento de datos, es preciso

1. que se introduzcan datos correctos y lo más exentos de ruido posible, y
2. que se disminuya en lo posible la complejidad del problema, es decir, que se reduzcan el número de variables consideradas.

El garantizar que los datos son correctos requiere un trabajo exhaustivo de recopilación y filtrado de la información. Será preciso comprobar que la transmisión de datos no produce errores, que no existen sensores desajustados, etc. Esta tarea es un esfuerzo de comprobación de rangos de valores y de uso de técnicas estadísticas sencillas, por lo que no es relevante explicar los métodos usados. Detallar los métodos es el objetivo del segundo apartado de este capítulo.

Reducir el número de variables implicadas en el problema se aborda utilizando dos tipos de técnicas. En primer lugar se utilizan técnicas enfocadas a la selección de variables. Además, se usarán técnicas de proyección que intentan disminuir las dimensiones de un conjunto de datos para obtener su representación bidimensional. Aunque no se obtenga un resultado analítico, sí se logran importantes observaciones sobre la relevancia de ciertas variables. Estas técnicas serán explicadas en el tercer apartado.

Una vez que se han determinado las variables más relevantes para el modelo, es necesaria una técnica que permita extraer la información subyacente en los datos recogidos y que implemente el modelo. Las redes neuronales son la herramienta más adecuada para la consecución de estos modelos tipo "caja negra". El último apartado del capítulo introduce esta técnica, detallando dentro del amplio campo que constituyen, el tipo de red utilizada en este trabajo.

3.2 Métodos de Selección de Variables

Una selección de las variables es un proceso de búsqueda de aquellas variables que contuvieran la información más significativa entre todos los datos originales. La formulación general de la selección de variables es la siguiente:

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Para el vector de datos original $\bar{x} = (x_1, \ldots, x_D)$ encontrar un $\bar{x}' = (x_1, \ldots, x_d)$ con una dimensión reducida $d < D$ que represente los datos originales de forma más compacta.

Uno de los problemas fundamentales de la selección de variables es la imposibilidad de encontrar la solución optima utilizando una búsqueda exhaustiva. Incluso para una relativamente pequeña dimensión, el número de posibles combinaciones es imposible de analizar. Sin embargo, en muchos de los casos puede ser implementada una aproximación heurística. Básicamente una selección de variables consiste en tres pasos:

1. una estrategia de búsqueda,
2. un criterio de selección, y
3. una condición para detener la búsqueda.

En este trabajo se utilizaron tres técnicas de selección distintas: el algoritmo Univariante, el del análisis de la covarianza múltiple, y el del mínimo error. Estos tres algoritmos se encuentran perfectamente descritos en el trabajo de Rauber, Barata y Steiger-Garção, *[Rau93]*.

3.2.1 Algoritmo Univariante

Dado que las diferentes variables no son independientes unas de las otras, el análisis debe ser realizado en un contexto claramente multivariante. Sin embargo, es útil realizar una primera aproximación en la que se ignore esta interdependencia entre variables, analizando cada variable por separado *[Rau93]*, y usar el criterio de separación para las clases propuesto en [*Gui91*].

Las hipótesis consideradas son las siguientes:

1. Las variables son independientes.
2. La probabilidad condicionada para una clase dada de dos o más variables, es el producto de las probabilidades condicionadas de las variables.

$$p((x_1, \ldots, x_d)|\omega) = \prod_{k=1}^{d} p(x_k|\omega) \qquad (3.1)$$

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Cada variable x_k es distribuida de una forma unimodal con media μ_k y desviación estándar σ_k. Estos dos parámetros son estimados desde la media y varianza de las muestras respectivamente.

Para la clase ω_i y un valor de la variable x, la distancia probabilística normalizada entre la media de la clase y el valor de la variable viene dada por:

$$dis_i(x) = \frac{|x - \mu_i|}{\sigma_i} \qquad (3.\ 2)$$

para $dis_i(x) = dis_j(x) = dis$ se verificar que si x se supone localizada entre μ_i y μ_j con $\mu_i < \mu_j$:

$$dis = \frac{\mu_i - \mu_j}{\sigma_i + \sigma_j} \qquad (3.\ 3)$$

Para σ_i y σ_j decrecientes y una distancia entre μ_i y μ_j creciente, se comprueba que *dis* es creciente, Lógicamente valores altos de *dis* expresan una distancia entre las clases ω_i y ω_j alta.

Si la inecuación de Chebychev

$$p\{|x - \mu_i| \geq \varepsilon\} \leq \frac{\sigma_i^2}{\varepsilon^2} \qquad (3.\ 4)$$

es aplicada a la distancia normalizada $dis_i(x)$ y para x, donde las distancias $dis_i(x)$ y $dis_j(x)$ son iguales, se obtiene:

$$p\{dis_i \geq dis\} \leq \frac{1}{dis^2} \qquad (3.\ 5)$$

Esta probabilidad debería de ser tan pequeña como sea posible. Una probabilidad pequeña es equivalente, en la práctica, a un valor de la variable está situado más próximo a su propia clase que a otra.

Por tanto, el siguiente término debería también ser mínimo para una variable altamente discriminante:

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

$$\frac{1}{dis^2} \tag{3. 6}$$

Esto permite establecer una medida cuantitativa de la separación entre dos clases:

$$\Delta(\omega_i,\omega_j) = 1 - \left(\frac{\sigma_i - \sigma_j}{\mu_i - \mu_j}\right)^2 \tag{3. 7}$$

Esta función de distancia expresa lo bien que cierta característica puede distinguir dos clases. El valor *1.0* es el óptimo y dice que dos clases están bien separadas. Este valor disminuye para separaciones menos claras y puede llegar a ser negativo para clases con grandes solapamientos.

Calculando la media de todas las distancias entre clases se obtiene finalmente el criterio de selección del algoritmo univariante:

$$Criterio(Univariante) = \frac{2}{c(c-1)} \sum_{i=1}^{c-1} \sum_{j=i+1}^{c} \Delta(\omega_i,\omega_j) \tag{3. 8}$$

donde *c* es el número de clases.

La principal ventaja de este método es la velocidad de cálculo. El coste computacional es muy bajo debido a que las variables son consideradas secuencialmente y ordenadas. Otra desventaja es que una variable simple puede ser clasificada como de poco poder de discriminación, y sin embargo, combinando con otras pudiera tener un gran poder discriminatorio.

El algoritmo univariante puede escribirse como sigue:

```
1) Para todas las variables:
       Calcular el criterio Univariante
2) Ordenar todas las variables siguiendo el criterio
   calculado en 1).
3) Elegir la variable con mejor dis.
```

El valor de la distancia *dis* puede ser especificado a priori por el usuario, o puede ser determinado en función de la estimación de error.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

3.2.2 Algoritmo del Análisis de la Covarianza Múltiple

Este tipo de estrategia de selección de variables toma en consideración la dependencia entre las variables. Se considera un vector cuyas componentes son variables ordenadas de forma aleatoria como una variable multivariante. Se espera que alguna variable contenga una gran cantidad de información sobre las distribuciones de clases. Por otro lado, pueden existir algunas variables que no aporten ninguna información.

El Análisis de la Covarianza Múltiple hace aseveraciones sobre unas variables adicionales llamadas predictores, las cuales son comparadas con unas variables seleccionadas llamadas controles. La teoría de esta estrategia puede ser consultada en [*Coo71*]. En general, se considera un conjunto de variables seleccionadas (controles) y se calcula para cada variable que no ha sido ya seleccionada el *F-Ratio* univariante. Entonces se tendrá *d-1* variables de control y *1* variable predictora.

Las hipótesis de partida, en este caso, es que las variables son multivariantes normalmente distribuidas.

Y el criterio de selección es el siguiente:

$$\bar{\mu}_k = \frac{1}{N_k}\sum_{i=1}^{N_k}\bar{x}_{k_i} \qquad \bar{\mu} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{c}\sum_{i=1}^{N_k}\bar{x}_{k_i} \tag{3. 9}$$

c	Número de clases.
N	Número total de muestras.
N_k	Número de muestras en la clase k.
P	Número de variables de control.
q	Número de todas las variables predictoras
$\bar{x}_{k_i} = (x_{1,k_i},\ldots,x_{p,k_i},x_{q,k_i})$	k_i muestra de la clase k que consiste en p variables seleccionadas y q variables de control.
$\bar{\mu}_k$	Centroide local para la clase k.
$\bar{\mu}$	Centroide global para todas las clases.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

La matriz total T estará compuesta por la suma de las matrices A y W, cumpliéndose que $T=A+W$.

$$T = \sum_{k=1}^{c} \sum_{i=1}^{N_k} \bar{x}_{k_i} \bar{x}_{k_i}^T \qquad (3.\ 10)$$

$$A = \sum_{k=1}^{c} \sum_{i=1}^{N_k} (\bar{\mu}_k - \bar{\mu})(\bar{\mu}_k - \bar{\mu})^T \qquad (3.\ 11)$$

$$W = \sum_{k=1}^{c} \sum_{i=1}^{N_k} (\bar{x}_{k_i} - \bar{\mu}_k - \bar{\mu})(\bar{x}_{k_i} - \bar{\mu}_k - \bar{\mu})^T \qquad (3.\ 12)$$

Cortando la matriz T y la matriz W siguiendo el siguiente esquema:

$$T = \left[\begin{array}{c|c} [T_{11}] & [T_{12}] \\ \hline [T_{21}] & [T_{22}] \end{array}\right] \qquad W = \left[\begin{array}{c|c} [W_{11}] & [W_{12}] \\ \hline [W_{21}] & [W_{22}] \end{array}\right] \qquad (3.\ 13)$$

Donde *(p-1,p-1),(p-1,1),(1,p-1),(1,1)* son las dimensiones de las submatrices $T_{11}, T_{12}, T_{21}, T_{22}$ respectivamente. Análogamente para la matriz W.

La *Matriz Total Residual* $T_{2.1}$, y la *Matriz Sin Residuo* $W_{2.1}$ están definidas de la siguiente manera:

$$T_{2.1} = T_{22} - T_{21} T_{11}^{-1} T_{12} \qquad W_{2.1} = W_{22} - W_{21} W_{11}^{-1} W_{12} \qquad (3.\ 14)$$

Ahora se puede definir el *j-ésimo F-Ratio* univariante como:

$$F_j = \frac{(t_{2.1_{jj}} - w_{2.1_{jj}}) / f_1}{(w_{2.1_{jj}} / f_2)} \qquad (3.\ 15)$$

con $f_1 = c - 1$ grados de libertad para el numerador, y $f_2 = N - c - p$ grados de libertad para el denominador.

Para un número de predictores $q=1$ el índice j sólo puede tomar el valor *1*.

Finalmente, el criterio de selección para el algoritmo de la covarianza múltiple es el siguiente:

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

$$Criterio(Covarianza\_Múltiple) = F_1$$

El coste computacional de este método es relativamente alto si se compara con el anterior. Especialmente los cálculos matriciales para A, W, la inversión de las submatrices, y su multiplicación por otras. Sin embargo, el principal beneficio de este algoritmo es su carácter multivariante.

El algoritmo podría quedar como sigue:

```
1) Se escoge una variable de forma arbitraria como la
primera variable de control.
2) Repetir
    2.1) Para todas la variables no seleccionadas u:
        2.1.1) Escoger u como variable predictora
        2.1.2) Calcular el criterio de la covarianza
               múltiple
        2.1.3) Ordenar todas las variables siguiendo el
               criterio calculado en 2.1.2
    2.2) Unir las variables que hayan alcanzado el valor
        más alto en el cálculo del criterio con las
        variables de control y con las variables
        seleccionadas.
  Hasta (que se alcance el número deseado de variables
  seleccionadas) o (el máximo de todos los valores
  calculados caiga por debajo de un cierto valor,
  típicamente 4.0)
```

3.2.3 Algoritmo Mínimo Error

Este método es similar al anterior . Se tiene un conjunto de variables previamente seleccionadas, y el resto de variables son posibles candidatas. La filosofía de esta estrategia es juntar aquellas variables con las seleccionadas, de tal forma que se obtenga el menor error posible estimado en la clasificación. La estimación del error se realiza con las variables ya seleccionadas junto con las candidatas. Cada variable no seleccionada previamente es considerada candidata. La estimación del error es independiente de la estrategia de selección.

En esta estrategia no se asume ninguna hipótesis acerca de las clases.

El criterio de selección es el siguiente: se diseña un clasificador a partir de las muestras $\bar{x}_1,...,\bar{x}_N$, usando para ello un subconjunto de j variables elegidas entre todas ellas:

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

$$\bar{x}_i = (x_{is_1},...,x_{is_j}) \tag{3.16}$$

Se estima el error $\hat{e}(j)$ que el clasificador tendrá durante su funcionamiento utilizando para ello una técnica estándar de estimación del error. El criterio de selección es:

$$Criterio(Mínimo\_Error) = \hat{e}(j) \tag{3.17}$$

Este método es multivariante en el sentido de que estima el error del clasificador tomando en consideración el conjunto completo de variables ya consideradas unido al de las candidatas. El coste computacional depende exclusivamente del procedimiento seguido para la estimación del error.

El algoritmo puede escribirse de la siguiente forma:

```
1) Repetir
    1.1) Para todas las variables no seleccionadas u.
         1.1.1) Escoger u como candidata.
         1.1.2) Estimar el error de un clasificador que
                considere las variables ya seleccionadas,
                junto con las candidatas.
         1.1.3) Ordenar todas las variables siguiendo el
                criterio calculado en 1.1.2.
    1.2) Juntar las variables con el menor error con las
         variables previamente seleccionadas.
Hasta (Se encuentre el número deseado de variables)
```

3.2.4 Splines Regresivos Multivariantes Adaptativos – (MARS)

Un problema común en muchas disciplinas es la adecuada aproximación de funciones de muchas variables, conocido únicamente el valor de dicha función en un reducido grupo de puntos del espacio de la variable independiente y, a menudo, perturbado por el ruido. El objetivo es encontrar el modelo de dependencia entre la variable respuesta y las variables de entrada $x_i,...,x_n$ una vez que se han realizado unas muestras $\{y_i, x_i,...,x_n\}_1^N$. El sistema que genera los datos se puede describir como:

$$y = f(x_1,...,x_n) + \varepsilon \tag{3.18}$$

sobre un dominio $(x_1, K, x_n) \in D \subset R^n$, el cual, contiene los datos.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Donde la función *f* relaciona la variable de salida con las variables de entrada y ε es el ruido estocástico. El objetivo del análisis de regresión es encontrar una función $\tilde{f}(x_1, L, x_n)$ que sirva como una razonable aproximación de $f(x_1, \Lambda, x_n)$ sobre el dominio D de interés.

Para ello se considera un tipo de funciones denominadas *funciones básicas* B_m de la forma:

$$B_m(x) = I[x \in R_m] \qquad (3.19)$$

I es una función que toma el valor 1 si el argumento es cierto, y el valor 0 en caso contrario. Los $\{a_m\}_1^M$ son los coeficientes de expansión cuyos valores son ajustados para obtener una buena adaptación a los datos. Los $\{R_m\}_1^M$ son las subregiones de espacio donde está definida la función. Si estas subregiones son disjuntas, sólo una función básica es distinta de 0 para cada *x*.

La principal limitación del método anterior es su falta de continuidad entre subregiones vecinas. Esta falta de continuidad limita severamente la precisión de la adaptación. Para conseguir modelos continuos, con derivadas continuas, se desarrollo el método de splines regresivos adaptativos (Multivariable Adaptative Regressive Splines, MARS).

El único aspecto que introduce discontinuidades en el modelo es la función escalón. Si se reemplaza esta función por otra que sea continua, el algoritmo 1 debería de producir modelos continuos. La función elegida para reemplazar a la función escalón es un *spline*.

Las dos partes de la división de la función básica tienen la forma:

$$b_q^{\pm}(x-t) = [\pm(x-t)]_+^q \qquad (3.20)$$

donde t es la localización del nodo, q es el orden del *spline*, y el subíndice indica la parte positiva del argumento.

Para $q > 0$ la aproximación por *splines* es continua, y con *q-1* derivadas continuas.

Las funciones escalón son un caso particular en que los *splines* son de grado cero, *q=0*.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Este método produce unas funciones básicas son el producto de *splines* univariantes. Estas funciones básicas tienen la forma:

$$B_m^{(q)}(x) = \prod_{K=1}^{K_m} \left[s_{km} \cdot \left(x_{v(k,m)} - t_{km} \right) \right] \qquad (3.\ 21)$$

Es decir, reemplazando las funciones escalón por *splines* de grado q, se consiguen modelos continuos, con q-1 derivadas continuas.

El modelo MARS se escribe de la siguiente forma:

$$\tilde{f}(x) = a_0 + \sum_{K_m=1} f_i(x_i) + \sum_{K_m=2} f_{ij}(x_i, x_j) + \sum_{K_m=3} f_{ijk}(x_i, x_j, x_k) + L \qquad (3.\ 22)$$

El primer sumatorio contiene todas aquellas funciones que dependen de una sola variable. El segundo contiene las funciones básicas que dependen de dos variables, y representa las interacciones entre dos variables. El tercer sumatorio representa la contribución de las interacciones entre tres variables, y así sucesivamente.

Sea $(m) = \{v(k,m)\}_1^{Km}$ el conjunto de variables asociada con la función básica m, $B_m(x)$. Cada función del primer sumatorio puede ser expresada como

$$f_i(x_i) = \sum_{\substack{K_m=1 \\ i \in V(m)}} a_m B_m(x_i) \qquad (3.\ 23)$$

Esto es la suma de todas las funciones básicas que envuelven solamente la variable x_i y es el *spline* que representa la función univariante correspondiente.

Cada función bivariante del segundo sumatorio puede ser expresada como:

$$f_i(x_i, x_j) = \sum_{\substack{K_m=2 \\ (i,j) \in V(m)}} a_m B_m(x_i, x_j) \qquad (3.\ 24)$$

Lo cual representa la suma de todas las funciones básicas que envuelven un determinado par de variables x_i y x_j. Sumándole la correspondiente contribución univariante para esas mismas variables se tendrá:

$$f_{ij}^*(x_i, x_j) = f_i(x_i) + f_j(x_j) + f_{ij}(x_i, x_j) \qquad (3.\ 25)$$

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

que representa el conjunto de la contribución bivariante de x_i y x_j al modelo. Procediendo de la misma manera se obtienes las contribuciones de los términos correspondientes a grupos de tres variables y más variables.

3.3 Métodos de Proyección

3.3.1 Generalidades

La representación de un conjunto de vectores *d*-dimensionales sobre un plano se llama *operación de proyección*, y el resultado de esta operación se denomina *proyección.* A menudo, el término *proyección* se utiliza para denominar indistintamente la operación y el resultado. La evaluación de una proyección se basa en su "fidelidad"; es decir, en cuánta información fue capaz de retener después del proceso de reducción de la dimensión del espacio. La fidelidad, normalmente medida con la ayuda de criterios asociados a los métodos de proyección, es una característica esencial en este tipo de algoritmos y la forma del criterio tiene un impacto fundamental en la sistematización de las diferentes técnicas de proyección.

Desde un punto de vista matemático, los métodos de proyección son casos especiales de métodos de reducción dimensional. En particular, aquellos métodos de proyección que reducen la dimensión del espacio a una o dos dimensiones son especialmente interesantes, debido a que las imágenes planas de los datos pueden ser entendidas y analizadas más fácilmente por un observador humano. Así, estos métodos pueden ser utilizados como una poderosa herramienta de análisis de datos y son cualitativamente distintos de aquellos que reducen el espacio a dimensiones superiores a dos.

El método de proyección más extendido está basado en el algoritmo de clasificación lineal de los datos, propuesto por R. A. Fischer en 1936 *[Fis36],* siendo conocido como el *discriminante de Fischer.* El siguiente intento satisfactorio se produce 30 años después. Debido al avance de la computación en el terreno gráfico, se abren nuevas posibilidades en la utilización de representaciones gráficas para el análisis de datos. Surge así la proyección no lineal de Sammon *[Sam69]*, cuya característica más destacada es la conservación de distancias. No obstante, la proyección de Sammon presenta algunos problemas de computación, lo que alienta la búsqueda de métodos más eficientes. Entre éstos problemas destaca la necesidad de volver a calcular todos los puntos cuando se quiere añadir una nueva

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

observación, con el tiempo de computación que esto implica, provocando su incapacidad de uso en tiempo real

Existen un gran número de familias de técnicas de proyección, de las que la mayoría tiene más de una versión, con lo que el número total de técnicas muy elevado. Considerando que muchos de los algoritmos necesitan, para su operación, que el usuario estime previamente varios parámetros, está claro que la elección de la proyección que mejor se ajusta a los datos no es una tarea fácil.

Los métodos de proyección se pueden sistematizar de muchas maneras. Desde el punto de vista de su aplicabilidad a un problema - a saber, agrupamiento y diseño interactivo de clasificadores - la característica fundamental de los métodos de proyección es la generalidad de la transformación de la proyección. Distinguiremos entre transformaciones analíticas y no analíticas.

1. Una *transformación analítica* proyecta cada punto del espacio multidimensional (incluyendo todos los puntos que no estén en el conjunto original) en un punto correspondiente sobre el plano imagen. Esta característica hace las transformaciones analíticas convenientes para el diseño directo de clasificadores. Esto es, la técnica de diseñar clasificadores consistente en el trazado de zonas límite de decisión en un espacio bidimensional imagen de los datos. Además, en ocasiones son capaces de reproducir el espacio original de los datos, generando hipersuperficies.
2. Una *transformación no analítica* crea proyecciones (imágenes planas) sólo para los puntos que pertenecen al conjunto de datos. Para añadir un punto al espacio imagen es necesario volver a realizar toda la transformación. En la práctica esto significa que las transformaciones no analíticas son inútiles para el diseño directo de clasificadores y sólo pueden ser útiles para inferir la estructura intrínseca de los datos analizados.

La separación de los métodos de proyección en analíticos y no analíticos corresponde casi exactamente a la separación entre proyecciones lineales y no lineales.

El número de clases especificadas en los datos es otro atributo importante de las proyecciones. Así, se pueden distinguir métodos que:

1. No requieren clasificación previa,

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

2. Necesitan exactamente dos clases, y que tratan de mantener la separabilidad de las dos clases y
3. Están definidos para al menos tres clases preestablecidas.

La característica más importante de las técnicas de proyección es que pertenecen a un pequeño grupo de métodos de análisis de datos multivariables que son capaces de soslayar el "Problema de la Dimensionalidad". Esta expresión describe las limitaciones de los métodos estadísticos debido a la necesidad de que el número de muestras crezca exponencialmente al aumentar la dimensión del espacio de datos. Esta característica es inapreciable en el reconocimiento de patrones, donde la capacidad de optimizar el uso eficiente de los datos e ignorar variables irrelevantes - redundantes o ruido - es de la máxima importancia *[Wer74]*.

3.3.2 Proyección de Sammon

Uno de los métodos no analíticos y no lineales más extendidos es el propuesto por Sammon en 1.969 *[Sam69]*.

Sean N vectores en un espacio L-dimensional, X_i, $i=1,\ldots, N$. Tomemos N vectores en un espacio M-dimensional $(M=2$ ó $3)$, Y_i, $i=1,\ldots,N$. y definimos una distancia en cada espacio $d_{ij}^* \equiv [X_i, X_j]$ y $d_{ij} \equiv [Y_i, Y_j]$

Escogidos aleatoriamente los N vectores en el espacio M:

$$Y_1 = \begin{bmatrix} y_{11} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y_{1M} \end{bmatrix} \quad Y_2 = \begin{bmatrix} y_{21} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y_{2M} \end{bmatrix} \quad \ldots \quad Y_N = \begin{bmatrix} y_{N1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y_{NM} \end{bmatrix} \tag{3.26}$$

se calculan las distancias entre ellos, sean d_{ij}. A partir de estas distancias se define el error E, que representa hasta que punto la configuración actual de N puntos del espacio M-dimensional coincide con los N puntos en el espacio L-dimensional.

$$E = \frac{1}{\sum_{i<j} \left[d_{ij}^* \right]} \sum_{i<j}^{N} \frac{\left[d_{ij}^* - d_{ij} \right]^2}{d_{ij}^*} \tag{3.27}$$

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

El error es una función de *MxN* variables y_{pq}, con $p=1,...N$ y $q=1,...M$. Las y_{pq} variables se deben obtener mediante un método adecuado de minoración (mínimo descenso, gradiente, etc.).

El funcional es el caso especial de un método de proyección más general conocido en Estadística como *Técnicas de escalado métrico multidimensional*. A la luz de una crítica posterior realizada por Kruskal *[Kru73]*, la contribución de Sammon no parece ser muy novedosa. No obstante, las técnicas de normalización multidimensional se utilizaron inicialmente en el campo de las ciencias sociales y Sammon fue el primero en popularizar esta aproximación como una herramienta válida en el reconocimiento de patrones y el análisis de datos de ingeniería. Por esta razón, en vez del de normalización multidimensional, comúnmente se asocia el nombre de Sammon con la ecuación anterior.

La expresión a minimizar se puede generalizar según la propuesta de Niemann *[Nie79]*, que utilizan una expresión más general:

$$E_s = \frac{1}{\gamma_p} \sum_{i<j} \delta\left(x_i, x_j\right)^p \cdot \left[\delta\left(x_i, x_j\right) - \delta\left(y_i, y_j\right)\right]^2 \qquad (3.\ 28)$$

donde γ_p se define como $\gamma_p = \sum_{i>j} \delta\left(x_i, x_j\right)^{p+2}$.

Dependiendo del valor de *p* distinguiremos:

1. *Método de Proyección Local* ($p < 0$). Tiende a proyectar puntos que están próximos de una forma más precisa que los que están algo más alejados entre sí, y donde el caso más habitual es el *Método de Sammon* ($p = -1$).
2. *Método de Proyección Neutra* ($p = 0$). Tanto los puntos próximos como los alejados entre sí, se proyectan con la misma precisión
3. *Método de Proyección Global* ($p > 0$). Proyecta mejor los puntos que están más alejados entre sí.

Las ventajas fundamentales de estos métodos son:

1. La función no depende de ningún parámetro de control.
2. Su eficiencia es alta, pues identifica estructuras de datos complejas (*hiperelipsoide d-dimensional*)

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

3. La proyección resultante es de fácil evaluación por el investigador.
4. La decisión humana facilita la clasificación de puntos conflictivos.
5. El algoritmo es simple y eficiente.

Entre sus limitaciones cabe destacar que:

1. La precisión del gráfico es mala si el error es muy grande (E>>0,1)
2. El número de puntos debe ser reducido.
3. El número de variables debe ser tan pequeño como sea posible, lo que obliga a utilizar previamente técnicas de discriminación.
4. No es analítica, aunque se han estudiado algunos métodos para determinar una inversa.

Generalmente, el problema de optimización dado por este funcional es complicado, debido a la gran dimensión que tiene el espacio de entrada. Esta dimensión es $2n$, es decir, dos veces el número de puntos proyectados. Puesto que el gradiente del funcional E_s se puede calcular con un tiempo y complejidad de $O(n^2)$, la complejidad total del problema es de al menos $O(n^3)$.

El algoritmo original utiliza una versión del algoritmo de gradiente con un factor de paso fijo. Se proponen otros algoritmos, incluyendo "el método de relajación" de Chang y Lee, el descenso con paso variable, el método del gradiente conjugado, y el método de Niemann y Weiss *[Nie79]*. No obstante, todos estos métodos están basados en el mismo principio, la optimización de una función a lo largo de una dirección preestablecida.

El fallo de aproximación depende de la función distancia Δ especificada.

3.4 Redes Neuronales

3.4.1 Introducción a la Computación Neuronal

Las redes neuronales representan una forma especial de procesamiento de la información. Una red neuronal es una estructura compuesta por muchas unidades, muy simples, de procesamiento o *neuronas*, cada una con memoria local, habitualmente pequeña. Las neuronas se conectan mediante canales de comunicación denominados *conexiones*, que manejan datos numéricos. Operan sólo con los datos locales, por lo que tienen un gran

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

potencial para el procesamiento paralelo, dado que los cálculos de los componentes en cada neurona son independientes.

La mayoría de las redes neuronales tienen algún tipo de regla de aprendizaje, de forma que los pesos de las conexiones se ajustan dependiendo de los patrones presentados. Actualmente existen muchos métodos de aprendizaje y su número se incrementa día a día. Según el tipo de patrones a utilizar, se distinguen dos grandes grupos.

- ***Redes Supervisadas***: Durante la fase de aprendizaje, se indica a la red qué salida debe producir cada patrón, ajustando los pesos en función de ese valor. El aprendizaje supervisado es el típico de las redes concebidas para el ajuste de datos.

- ***Redes No Supervisadas***: La red localiza en los datos de entrada propiedades que utiliza para separar los patrones en clases. El aprendizaje no supervisado es característico de las redes utilizadas en los casos en que los datos no tienen a priori ningún tipo de clasificación. La red se utiliza para detectar las regularidades intrínsecas de los datos estableciendo así la mejor clasificación posible.

De igual forma, en función de la topología pueden dividirse en dos grandes grupos:

- ***Redes Progresivas o unidireccionales***:.Estas redes están concebidas para transformar un determinado conjunto de datos de entrada en uno de salida. Cada conjunto de datos de entrada tiene uno correspondiente de salida. El objetivo es obtener una red que sintetice esta transformación, permitiendo la generalización de la función de transferencia a base de extrapolar a pares de datos semejantes. Así pues, los datos de aprendizaje de la red son pares entrada/salida, que la red debe seguir tras la fase de entrenamiento. El aprendizaje es supervisado y tiene lugar a través de un proceso de ajuste de los pesos sinápticos de las neuronas de la red, de forma tal que se satisfaga algún tipo de criterio de aproximación u optimización. Típicamente, la arquitectura de una red de este tipo es la de una red multicapa, donde las neuronas de cada capa están enlazadas con las de la siguiente. El prototipo de estas redes es el perceptrón multicapa, que después se estudiará en detalle.

- ***Redes Recurrentes o realimentadas***: Principalmente estas redes están concebidas para almacenar eficientemente información, de manera que cada ítem registrado se recupere con facilidad cuando la red se excita con una entrada similar. La red funciona como un sistema dinámico cuyos puntos de equilibrio representan los registros almacenados. Un

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

dato de entrada a la red se interpreta como el estado inicial del sistema, a partir del cual evoluciona hasta alcanzar el equilibrio, cuyo registro se toma como salida o respuesta de la red. El entrenamiento de la red consiste en ajustar sus pesos de manera que los puntos de equilibrio se ajusten a los registros especificados. Típicamente la arquitectura de estas redes es la de una red monocapa con una gran realimentación entre todas las neuronas. El modelo más conocido es la red de Hopfield, de la que se han derivado otros más complejos como las memorias bidireccionales o la red de Boltzmann.

3.4.2 Ventajas del Uso de Redes Neuronales

Las principales ventajas del uso de redes neuronales son las siguientes *[Gon99]*:

1. **Aprendizaje de la experiencia.** Las redes neuronales tienen una aplicación típica en aquellos sistemas en los que resulta complejo tanto especificarlos como encontrar una solución organizativa de los mismos, pero que tienen la particularidad de que generan gran cantidad y variedad de datos, de los que se puede inferir una respuesta de la que el sistema aprenderá.
2. **Generalización a partir de ejemplos.** Una propiedad de cualquier sistema de auto-aprendizaje es la habilidad de interpolar a partir de casos previos. Con un diseño cuidadoso, una red neuronal puede proporcionar altos niveles de generalización y dar la respuesta correcta a datos que nunca se habían presentado.
3. **Extracción de información de datos con ruido.** Puesto que en esencia son sistemas estadísticos, las redes pueden reconocer patrones subyacentes del ruido del proceso, una propiedad que es frecuentemente explotada en aplicaciones como la monitorización del proceso de las máquinas.
4. **Desarrollo de soluciones más rápido y con menos dependencia de expertos.** Las redes neuronales aprenden de los ejemplos de modo que, siempre que existan ejemplos suficientes y se adopte un diseño apropiado, se pueden construir soluciones efectivas mucho más rápidamente que con los procedimientos tradicionales.
5. **Adaptabilidad.** La naturaleza de las redes neuronales les permiten adaptarse a cualquier tipo de situación operativa. Por ejemplo, en una aplicación industrial pueden evitar las variaciones debidas a desgaste, etc.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

6. **Eficiencia computacional.** El entrenamiento de las redes neuronales demanda una gran potencia de computación, pero los requisitos en el modo de operación son muy modestos.

7. **No-linealidad.** Muchas otras técnicas están basadas en asumir cierta linealidad, lo que limita su aplicación a problemas del mundo real. Por su forma de construcción, las redes neuronales son grandes procesadores no lineales que pueden ser entrenados para su uso en un amplio rango de situaciones complejas *[Sjö95]*.

Sin embargo, es necesario tener en cuenta, que todas estas ventajas dejarían de serlo si el problema a tratar no se adaptase a su modelado mediante esta técnica, o existiese algún inconveniente de índole práctica que impidiese su implantación.

3.4.3 Evolución Histórica

Se considera el inicio de la utilización de redes neuronales en el área de la computación el trabajo publicado por W. McCulloch y W. Pitts *[McC43]*, en el que presentan un modelo simple de cálculo neuronal basado en el comportamiento de las neuronas biológicas y que realizaba cualquier función lógica o aritmética. Es la primera vez que se asimila el cerebro a un organismo computacional. Tal como indican Anderson y Rosenfeld *[And88]*, hay una idea fundamental que no se ponía de manifiesto en el artículo de McCulloch y Pitts: aunque las neuronas son dispositivos sencillos, se puede obtener una gran potencia de cálculo cuando se conectan adecuadamente entre sí.

Entre los años 50 y 60 se llevan a cabo diferentes trabajos que pondrán las bases para futuros desarrollos. En 1.951 Marvin Minsky *[Min54]* construye el primer ordenador, *Snark*, orientado a redes, que sin realizar ningún procesamiento de información especial, sirvió de ayuda para diseños posteriores. Nils Nilsson *[Nil65]* resume la mayor parte del trabajo realizado en esta época.

En 1.959 Widrow y Hoff *[Wid60]* desarrollan el *Adaline* (*Adaptive Linear Element*), que es uno de los modelos más sencillos de neurona con capacidad de aprendizaje: es un dispositivo que consta de un único elemento de procesamiento. En este caso se debe hablar de un tipo de elemento de procesamiento más que de una red neuronal propiamente dicha. Posteriormente, para aumentar la capacidad de decisión, se emplean varios de estos elementos trabajando en paralelo, lo que da origen al *Madaline* (*Multiple Adaline*).

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

En 1.959 Frank Rosenblatt *[Ros59]* publica el primer resultado importante en el cálculo de redes neuronales: el desarrollo del *Perceptrón.* El *Perceptrón* es un sistema de clasificación de patrones que puede identificar patrones geométricos y abstractos, debido a que tiene cierta capacidad de aprendizaje. Además, Rosenblatt prueba que el *Perceptrón* es capaz de clasificar cualquier conjunto de entrenamiento linealmente separable, mientras que el *Adaline* falla en algunos casos.

A mediados de los años 60, M. Minsky y S. Papert del MIT, *[Min69]* realizan un análisis minucioso y riguroso del *Perceptrón* en términos de sus capacidades y limitaciones. El principal resultado de esta investigación es que el *Perceptrón* sólo puede distinguir tramas si éstas son linealmente separables. Dado que hay muchos problemas de clasificación que no son linealmente separables, esta condición impone unos límites bastante restrictivos a la aplicabilidad del *Perceptrón.* Este problema se resuelve introduciendo una nueva capa, lo que da lugar al Perceptrón Multicapa (*MultiLayer Perceptron, MLP*). De este modo se puede construir una función discriminante válida para las regiones que no son linealmente separables. En este caso aparece un problema serio, y es que el ajuste de los pesos en la red no puede realizarse de forma directa, debido a la existencia de la capa intermedia.

En el período que va de 1.967 a 1.982 se investigó poco en EE.UU. en el campo de los sistemas neuronales. La investigación en Japón, Europa y la Unión Soviética se vio menos afectada destacando los trabajos sobre construcción de modelos neuronales basados en datos neurológicos de Stephen Grossberg *[Gro76].* La clase de modelos que comienza a desarrollar cae dentro de las redes denominadas ART *[Car88].*

Desde principios de los 70 Teuvo Kohonen realiza investigaciones importantes con memorias asociativas y aprendizaje adaptativo *[Koh77].* Una de sus contribuciones es el principio de aprendizaje competitivo. En él los elementos de proceso compiten para responder a un estímulo y el elemento ganador se autoadapta para tener más responsabilidad en la respuesta al estímulo siguiente.

La computación neuronal recibe entre los años 1.983 y 1.986 el apoyo de un investigador mundialmente considerado, John Hopfield, que se había interesado por este campo unos pocos años atrás. Hopfield publicó dos trabajos *[Hop82] [Hop84]*, que, junto a múltiples conferencias dadas en todo el mundo, persuadiendo a muchos científicos para realizar investigaciones en el campo de las redes neuronales.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

En 1.986 se produce la consolidación definitiva con la publicación del libro de D. Rumelhart y J. McClelland *Parallel Distributed Processing [Rum86]*. En estos trabajos se da respuesta al problema del aprendizaje planteado por el Perceptrón Multicapa, desarrollando el método de retropropagación (*Backpropagation)*.

3.4.4 Modelos de Redes Neuronales

La variedad en cuanto a topologías, funciones de activación, etc., hace que la simple descripción de las distintas redes neuronales se convierta en un tema demasiado amplio como para abordarlo aquí. Por ello se tratarán exclusivamente aquellos tipos de redes que serán utilizadas en el desarrollo del trabajo que se expondrá en el siguiente capítulo.

3.4.4.1 Redes Progresivas. El Perceptrón Multicapa

La topología mas conocida dentro de las redes de propagación hacia adelante es el *Perceptrón Multicapa*. Como se ha visto, un sólo *Perceptrón* tiene muchas limitaciones. La más importante es que no puede distinguir clases que no sean linealmente separables. Si se organizan un conjunto de ellos en capas, esta limitación queda superada. Cada capa consta de varias neuronas cuya entrada proviene de las unidades de la capa anterior, y cuya salida va a las unidades de la capa posterior, sin ningún contacto con cualquier otra capa, ni entre las neuronas de una misma capa. La primera capa, denominada capa de entrada, recoge la señal de entrada y no realiza sobre ésta ningún tipo de procesamiento. El resultado de la red viene dado por el estado de las neuronas de la última capa, denominada capa de salida. Las capas intermedias se denominan capas ocultas.

Uno de los ejes centrales de las investigaciones en el campo de las redes neuronales es cómo ajustar los pesos de los enlaces para obtener el comportamiento deseado del sistema. Esta modificación esta basada a menudo en la regla de Hebb, que indica que el enlace entre dos unidades debe ser reforzado si ambas unidades se activan al mismo tiempo. La forma más general de la regla de Hebb es:

$$\Delta w_{ij} = g\left(a_j(t), t_j\right) \cdot h\left(o_i(t), w_{ij}\right) \qquad (3.29)$$

donde:

w_{ij}	Peso de la conexión desde la neurona *i* hasta la neurona *j*.
$a_j(t)$	Activación de la unidad *j* en el tiempo *t*.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

t_j	Salida deseada de la unidad j en un patrón de aprendizaje.
$o_i(t)$	Salida de la unidad i en el tiempo t.
$g(...)$	Función, depende de la activación de la unidad y de la función de aprendizaje.
$h(...)$	Función, depende de la salida de la unidad precedente y del peso de la conexión..

En las redes con varias capas, tanto el número de capas como el de neuronas en cada capa son parte esencial del diseño. El número de capas está íntimamente relacionado con la velocidad de aprendizaje, por lo que comúnmente el número de capas ocultas se reduce a una o dos. Del número de neuronas en las capas ocultas depende el número de parámetros libres en el modelo y su operatividad. Si son pocas es imposible lograr el ajuste y si son excesivas se pierde generalidad.

En general, se emplean redes neuronales multicapa con aprendizaje por retropropagación del error para simular una función desconocida a partir de los pares de señales de entrada y salida obtenidos de los ejemplos de aprendizaje *[Son92]*. Se espera en estos casos que la red sea capaz de generalizar adecuadamente, de forma que ante señales de entrada que no hayan sido presentadas previamente como patrones de aprendizaje se obtenga la salida adecuada. Aunque hay otros algoritmos basados en la misma topología *[Bra92], [Fal91a], [Fal91b]*, las más extendidas son las siguientes:

3.4.4.2 Redes de Retropropagación (Backpropagation)

Es el algoritmo más famoso en redes progresivas supervisadas. La regla de actualización de los pesos, también denominada *regla delta generalizada [Zel93]*, se escribe como:

$$\Delta w_{ij} = \lambda \delta_j o_i \qquad (3.30)$$

$$\delta_j = \begin{cases} f'_j(s_j)(t_j - o_i) & \text{si la unidad } j \text{ es de salida} \\ f'_j(s_j)\sum_k \delta_k w_{jk} & \text{si la unidad } j \text{ es oculta} \end{cases}$$

donde:

s_j	Suma de las entradas ponderadas por los pesos de las conexiones.
λ	Factor de aprendizaje (constante).
δ_j	Error en la unidad j (diferencia entre la salida real y la deseada).
t_j	Salida deseada de la unidad j.
$o_i(t)$	Salida de la unidad y en el tiempo t.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

i	Índice de las unidades precedentes de la j con enlaces w_{ij} de i hacia j.
j	Índice de la unidad actual.
k	Índice de las unidades posteriores a la j con enlaces w_{jk} de j hacia k.

En ocasiones esta fórmula se corrige introduciendo un término denominado *momento*. Los pesos se actualizan de acuerdo a la regla precedente, y se evalúa el error. Si el error se decrementa, el cambio se reitera hasta que el error comienza a aumentar. En ese momento se evalúa el nuevo gradiente y continúa el aprendizaje. El término del momento introduce el cambio de los pesos antiguos como parámetro en el cálculo del cambio en los pesos actuales. Esto evita los problemas habituales de oscilación cuando la superficie de error tiene un área mínima muy reducida.

El nuevo cambio de pesos será:

$$\Delta w_{ij}(t+1) = \lambda \delta_j o_i + \alpha \Delta w_{ij}(t) \qquad (3.31)$$

donde α es una constante que indica la influencia del momento.

Algunos modelos incorporan variables aleatorias a la regla de actualización con la esperanza de que con algunos grados de aleatoriedad, el sistema pueda ser capaz de escapar al mínimo local *[Rum86]*. Este enfoque ha tenido algún éxito, pero añade complejidad al clasificador que puede dejar de ser válido. En general, concediendo el tiempo necesario y una η lo suficientemente pequeña, puede encontrarse un mínimo adecuado. Quedar atrapado en un mínimo local es habitualmente un problema menos importante si lo comparamos con el de encontrar la arquitectura correcta, el α y λ adecuados, así como las otras variables del algoritmo.

QuickProp

Otro método para acelerar el aprendizaje es usar información sobre la curvatura de la superficie de error. Esto requiere el cálculo de la derivada de segundo orden de la función de error. *Quickprop [Fal88]* supone que la superficie de error tiene un comportamiento local cuadrático y realiza en un sólo paso la modificación de los pesos para alcanzar el mínimo de la parábola. Después de calcular el gradiente como en *Backpropagation*, la variación de los pesos se estima como *[Zel93]*:

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

$$\Delta(t+1)w_{ij} = \frac{S(t+1)}{S(t)-S(t+1)}\Delta(t)w_{ij} \qquad (3.32)$$

donde S representa la derivada parcial de la función error en la dirección del peso w_{ij}.

3.4.4.3 Redes Recurrentes

Las redes progresivas son capaces de realizar una aplicación entre el espacio de entrada y el de salida, una vez entrenadas con pares de datos entrada-salida. Sin embargo, hay problemas donde no existen tales pares, esto es, se dispone de datos de entrada, pero no sus correspondientes datos de salida. Algunos ejemplos de este tipo de problemas pueden ser:

- *Agrupamiento*: los datos de entrada deben ser agrupados en conjuntos cuyas características son inherentes a los datos. La salida de la red es una etiqueta de identificación del conjunto al que pertenece cada dato de entrada.
- *Cuantificación vectorial*: este problema surge de la discretización de un espacio continuo. La entrada del sistema es un vector en un espacio *n*-dimensional, y su salida es una representación discreta del espacio de entrada. El sistema debe encontrar la discretización óptima de dicho espacio.

Reducción dimensional: intentan reflejar en un menor número de datos la mayor cantidad de información sobre la variación de los datos de entrada. En estos tipos de redes, el entrenamiento se realiza sin la presencia de un tutor externo, de modo que la adaptación de los pesos se basa, normalmente, en algún tipo de competición global entre las neuronas. Hay muchos tipos de redes auto organizadas, dependiendo del problema al que se desee aplicar. Uno de los esquemas más básicos es el propuesto por Rumelhart y Zipser *[Rum85]*. Otra red similar, pero con propiedades distintas, es el mapa topológico de Kohonen *[Koh77], [Koh82], [Koh88]*. Dentro de las redes auto organizadas cabe también destacar las redes ART, propuestas por Carpenter y Grossberg *[Car87] [Gro76]*, y el *Cognitrón* de Fukushima *[Fuk75]* y *[Fuk88]*.

3.4.4.4 Mapas Autoorganizados - SOM

Las redes con aprendizaje no supervisado (también conocido como aprendizaje autosupervisado) no requieren influencia externa para ajustar los pesos de las conexiones entre sus neuronas. La red no recibe ninguna información del entorno que le indique si la salida generada en respuesta a una determinada entrada es o no correcta; por ello, suele decirse que estas redes son capaces de *organizarse*.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

En el caso de las redes *SOM*, lo que se realiza es una identificación de características, obteniéndose en las neuronas de salida una disposición geométrica que representa un mapa topográfico de las características de los datos de entrada. De este modo si se presentan a la red informaciones similares, siempre serán afectadas neuronas de salida próximas entre sí en la misma zona del mapa.

El funcionamiento de esta red es relativamente simple. Cuando se presenta a la entrada una información $E_k=(e_1^{(k)},...,e_N^{(k)})$, cada una de las M neuronas de la capa de salida la recibe a través de las conexiones *Feedforward* con pesos w_{ji}. También estas neuronas reciben las correspondientes entradas debidas a las conexiones laterales con el resto de las neuronas de salida y cuya influencia dependerá de la distancia a la que se encuentren.

La formulación matemática del funcionamiento puede simplificarse mediante la siguiente expresión, que representa cuál de las M neuronas se activará al introducir la información E_k:

$$s_j=1 \Leftrightarrow min\|E_k-w_j\|=min\left(\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(e_i^{(k)}-w_{ij}\right)^2}\right) \qquad (3.\ 33)$$

$$s_j=0 \ en\ otro\ caso$$

donde

s_j Es la salida generada por una neurona de salida j ante un vector de entrada E_k.

w_j Es el vector de pesos de las conexiones entre cada una de las neuronas de entrada y la neurona de salida j.

Lo que hace la red SOM es realizar una tarea de clasificación, ya que la neurona de salida activada ante una entrada representa la clase a la que pertenece dicha información de entrada.

3.4.5 Evaluación de la Utilización Práctica de las Redes Neuronales

Actualmente puede asegurarse que las redes neuronales están definitivamente instaladas como una tecnología firmemente asentada. Sin embargo, no son una herramienta de validez universal y conviene delimitar sensatamente sus aplicaciones. Debe tenerse en cuenta que la computación neuronal está indicada sólo para un determinado tipo de problemas. Existen una serie de criterios básicos para decidir si la solución de un determinado problema es o no

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

susceptible de ser afrontada mediante una red neuronal, de si merece o no la pena considerar su utilización. Los más relevantes son los tres siguientes *[COT98]*:

- La solución del problema no es descriptible explícitamente mediante un algoritmo o un conjunto de reglas de decisión.

- Existe alguna evidencia de que entre las variables medibles de un proceso existe algún tipo de correlación o dependencia cuya forma, sin embargo, no es explicitable, pudiendo enunciarse solamente de manera ambigua.

- Se dispone de una amplia base de datos representativos de las posibles realizaciones del proceso que cubren todas las situaciones de interés.

Hay que destacar la importancia del tercer criterio relativo a la disponibilidad de datos. En términos generales puede decirse que una red neuronal será a lo sumo tan buena como lo sean los datos empleados en su entrenamiento. Si hay dudas sobre la posibilidad de utilizar datos convenientemente representativos del problema es, con toda probabilidad, inútil intentar una solución utilizando la computación neuronal.

Aplicando el criterio expuesto al problema objeto de este trabajo se llega a las siguientes conclusiones:

- El problema es demasiado complejo para abordarlo mediante métodos clásicos al involucrar un gran número de variables. Además, las interacciones entre las mismas distan de ser claras. Los modelos físicos propuestos deben recurrir a importantes simplificaciones que suponen limitaciones en su precisión, como se mostró en el *capítulo 2*.

- Experimentalmente, se constata con facilidad que las variables de control del sistema repercuten de forma directa sobre el espesor de recubrimiento. Variables como la presión de soplado o la posición de las cuchillas inciden de forma obvia en el valor del espesor

- Parte de las variables ya era almacenada en una base de datos. El resto de la información era recogida por el autómata de control. Sólo fue preciso establecer la comunicación entre el autómata y un ordenador dispuesto al efecto, para recoger de forma periódica los datos tanto de las acciones de control como de los sensores

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

conectados al autómata. El dato de más difícil acceso fue el correspondiente a la posición de las cuchillas de soplado. Requirió la instalación de un sistema de visión artificial capaz de obtener la posición de las cuchillas a través de imágenes tomadas en los momentos en que las cuchillas eran movidas por los operarios.

A modo general se ofrecen a continuación una serie de aspectos prácticos relacionado con el desarrollo de aplicaciones de redes neuronales *[COT98]*:

a) *Adecuación de los recursos utilizables*. Los elementos conceptuales básicos de la computación neuronal son sencillos y no requieren gran esfuerzo para su comprensión. Existe, además, una gran cantidad de software, en buena medida de dominio público, de manera que en general no se requiere gran esfuerzo de programación.

b) *Existencia de objeciones serias a la utilización de la computación neuronal*. El empleo de una red neuronal puede estar limitado por consideraciones de seguridad de funcionamiento, que puede ser un requisito insoslayable en ciertas aplicaciones.

c) *Problemas prácticos relacionados con la obtención de datos*. Como ya se ha comentado, el entrenamiento de una red neuronal requiere una amplia colección de datos representativos del problema objeto de estudio.

Como siempre que se introduce una nueva tecnología, es importante la ponderación cuidadosa de los factores que pueden conducir al fracaso de una iniciativa. Algunos puntos que hay que considerar en este sentido son los siguientes *[COT98]*:

- La estimación de los costes de recopilación y preprocesamiento de datos puede subestimarse, en especial si es necesario repetir experimentos con equipos costosos.
- Es difícil anticipar con precisión las prestaciones finales de una red neuronal. Por ello, siempre es posible que se produzca un déficit de resultados en el comportamiento de la red.
- El deficiente conocimiento de la tecnología neuronal puede repercutir en una elección inadecuada de la aplicación o un diseño ineficiente de la red neuronal.
- Los usuarios potenciales pueden resistirse a emplear una tecnología cuya justificación no es estándar, en la medida en que no se puede explicar, con las explicaciones al uso.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

3.5 Conclusiones

La técnica alternativa a emplear consta de tres etapas: recopilación y filtrado de los datos, selección de las variables más relevantes y aplicación de redes neuronales para la obtención de un modelo tipo "caja negra".

Dentro de las técnicas disponibles para la selección de las variables se han escogido algunas que representan distintas aproximaciones al problema. El algoritmo univariante es el método más sencillo y rápido. Aunque está gravemente limitado al no considerar las relaciones que las variables tienen entre sí, supone una buena primera aproximación que permite simplificar detectando variables cuya relación con la salida es relativamente sencilla.

El método de la covarianza múltiple tiene en cuenta las relaciones entre las variables. Naturalmente, el coste computacional es mucho más elevado que en el caso anterior. El algoritmo del mínimo error es semejante al anterior.

El método MARS utiliza funciones construidas a partir de *splines* que de forma incremental van incorporando los efectos de agrupamiento de dos, tres y más variables. El método proporciona, además, una gráfica bidimensional no lineal con la relación entre las variables que considera más relevantes y la salida.

Otro acercamiento más intuitivo consiste en proyectar un espacio n-dimensional sobre dos dimensiones. El método de proyección seleccionado es conocido como método de Sammon. Este método mantiene la distancia relativa entre los datos y permite observar en el gráfico la distribución relativa de los datos y los agrupamientos presentes en los mismos. La composición de estos agrupamientos permite detectar las relaciones entre las variables.

Una vez seleccionadas las variables más relevantes, la técnica utilizada para inferir el modelo a partir de los datos son las redes neuronales. Una red neuronal es una estructura compuesta por pequeñas unidades de procesamiento dotadas de memoria local. Parece una estructura sencilla, pero gracias a su capacidad de proceso en paralelo tiene una gran capacidad.

Se han desarrollado muchos tipos de redes neuronales, que se aplican preferentemente a problemas de clasificación. En casos como el aquí presentado, una simulación de un proceso industrial, el tipo de red más adecuado es el perceptrón multicapa. La capa oculta le permite seguir funciones no lineales. El aprendizaje o entrenamiento de la red, corrección de los

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

pesos de las neuronas para adecuar la red al sistema a simular, se realiza utilizando el algoritmo de retropropagación de manera supervisada. Para el entrenamiento se requiere un conjunto de datos de entrada y sus correspondientes datos de salida, de forma que los pesos de las neuronas se ajusten para que la red refleje el comportamiento real del sistema.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Capítulo 4

Análisis de Resultados

4.1 Introducción *108*

4.2 Modelo Analítico *108*
4.2.1 Hipótesis de Trabajo 109
4.2.2 Ecuaciones del Sistema 109
4.2.3 Definición del Dominio 111
4.2.4 Condiciones de Frontera 111
4.2.5 Formulación Débil del Problema 115
4.2.6 Simplificación de las Ecuaciones 120

4.3 Modelo Neuronal *122*
4.3.1 Planteamiento 122
4.3.2 Determinación del Espacio de Búsqueda 125
4.3.3 Empleo de Redes Neuronales 180
4.3.4 Desarrollo de las Simulaciones 185

4.4 Conclusiones *186*

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

4.1 Introducción

Para mejorar los modelos presentados en el *capítulo 2* se pueden emplear dos estrategias. La primera es solventar las limitaciones encontradas en los modelos matemáticos debidas a sus hipótesis de partida. Esta aproximación es desarrollada en el segundo apartado. Se enunciarán hipótesis alternativas, planteándose las ecuaciones del modelo y sus condiciones de frontera. Así mismo, se realiza una formulación débil del modelo que permitirá la resolución por métodos tales como los elementos finitos.

La segunda vía de aproximación a la mejora del modelo es utilizar una técnica alternativa. Estas técnicas, mostradas en el *capítulo 3*, permiten extraer la información de los datos recogidos del proceso. El desarrollo efectuado tiene dos objetivos complementarios. Por un lado determinar los punto óptimos de funcionamiento para cada tipo de recubrimiento apoyándose fundamentalmente en la proyección Sammon. Se clasificarán los datos estudiante cada uno de los grupos obtenidos con el objeto de determinar claramente los resultados que ofrecen determinadas condiciones de las variables independientes en el recubrimiento resultante.

Pro otra parte se generará un simulador de la línea capaz de avanzar cual va a ser el recubrimiento obtenido a partir de unas condiciones en las variables de proceso. El primer paso será analizar la relevancia de las variables de proceso en relación con las variables de proceso. Una vez determinadas las variables más relevantes, se estudiarán diversas variaciones de redes perceptrón múlticapa con aprendizaje por retropropagación supervisada. De entre ellas se escoge la mejor, estudiándose la calidad de los resultados obtenidos.

4.2 Modelo Analítico

A continuación se propone un modelo matemático del sistema de cuchillas de aire que soluciona algunas de las limitaciones encontradas en el modelo desarrollado por Thornton y Graff *[Tho76]*. La mejora se obtiene, eso sí, a costa de una mayor complejidad matemática. Sin embargo, gracias a la potencia de computación de los equipos informáticos actuales, la resolución de un modelo complejo como el aquí propuesto, no supone una barrera imposible de superar, mediante la utilización de métodos numéricos tales como los elementos o los volúmenes finitos.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

4.2.1 Hipótesis de Trabajo

Se realizarán las siguientes hipótesis sobre el fluido:

1. El flujo es estacionario, es decir, la distribución de velocidades, la presión y la temperatura no dependen del tiempo.
2. Supondremos que la descripción del movimiento del fluido se hace desde un sistema de referencia que se mueve con velocidad constante: $V_{banda}=(0,V_0)$
3. Consideraremos el fluido incompresible: la densidad es constante en el espacio, aunque varía con la temperatura.
4. El movimiento del fluido es lento pudiendo despreciarse el efecto de las fuerzas inerciales.
5. La viscosidad del fluido es variable con la temperatura.
6. La frontera que limita al fluido con el aire, es una frontera libre que depende solamente de *y* en el sistema de referencia escogido (es independiente del tiempo).
7. La viscosidad del aire exterior y del chorro es despreciable.
8. La superficie libre, que sirve de interfaz entre el fluido y el exterior, se comporta como una membrana elástica.
9. En el exterior existe un gradiente de presión originado por el chorro acabador y por la presión atmosférica.
10. La velocidad del fluido no influye en la temperatura.

Las diferencias fundamentales con respecto al modelo de Thornton y Graff son la consideración de la existencia de una frontera libre que se modela como una membrana elástica, y la consideración de la temperatura sobre la viscosidad que impide desacoplar las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento y de la energía.

4.2.2 Ecuaciones del Sistema

- ***Conservación de la Masa***

Si ρ es la densidad del fluido entonces el equilibrio de masa ρu_j entrando y saliendo de un volumen unidad requiere que:

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

$$\partial_t \rho + div(\rho \vec{u}) = 0 \qquad (4.1)$$

donde $\vec{u}$ es la velocidad del fluido.

- ***Conservación de Movimiento o Equilibrio Dinámico***

El momento cinético saliendo y entrando de un volumen de control, tiene que estar en equilibrio con las tensiones σ y las fuerza de masa ρf. Esto conduce a la ecuación:

$$\partial_t (\rho \vec{u}) + div(\rho \vec{u} \otimes \vec{u}) = div(\tilde{\sigma}(\vec{v})) + \vec{f} \qquad (4.2)$$

- ***Conservación de la Energía y Ecuación de Estado***

Se advierte que en las ecuaciones anteriores las variables independientes son u (la velocidad), p (la presión) y ρ (la densidad). Las tensiones se definieron en términos de velocidades y, por consiguiente, no son independientes.

Obviamente, hay una variable de más para que el sistema de ecuaciones resultante pueda resolverse. Sin embargo, si se supone que la densidad es constante (como en fluidos incompresibles), el sistema se completa y, por tanto, es resoluble. Este problema se corresponde con un caso casi incompresible, ya que existe una dependencia de las propiedades del fluido con la temperatura. Es preciso contar con la ecuación de la energía para poder resolver el problema.

La transferencia de energía puede tener lugar por convección y por conducción. El flujo de calor conductivo q se define como:

$$q_i = -K \frac{\partial}{\partial x_i} T \qquad (4.3)$$

Donde K es un coeficiente de conducción de calor isótropo.

Para completar las ecuaciones es necesario determinar los términos de fuente de calor. Estos se definen por unidad de volumen y deben incluir la disipación debida a las tensiones internas. El balance de energía en una unidad de volumen puede escribirse como:

$$\partial_t E + div(E\vec{u}) = -div\vec{q} + div(\tilde{\sigma}(\vec{u}) \cdot \vec{u}) + \vec{f}\vec{u} + f \qquad (4.4)$$

donde el penúltimo término representa el trabajo efectuado por las funciones másicas.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Por las hipótesis *(1)* y *(3)*, el fluido de nuestro problema es estacionario (no depende del tiempo) e incompresible (densidad constante en el espacio).

4.2.3 Definición del Dominio

Considerando el problema bidimensional, el dominio está limitado por las siguientes fronteras:

$$\Gamma_{basepote} = \{(x,0) / 0 \le x \le \text{Ancho\_pote}\} \qquad (4.\ 5)$$

$$\Gamma_{banda} = \{(0,y) / 0 \le y \le \text{Alto\_Banda}\} \qquad (4.\ 6)$$

$$\Gamma_{alto} = \{(x, \text{Alto\_Banda}) / 0 \le x \le \Phi(\text{Alto\_Banda})\} \qquad (4.\ 7)$$

$$\Gamma_{paredpote} = \{(\text{Ancho\_pote}, y) / 0 \le y \le \text{Alto\_pote}\} \qquad (4.\ 8)$$

$$\Gamma_{libre} = \{\Phi(y) / \text{Alto\_pote} \le y \le \text{Alto\_Banda}\} \qquad (4.\ 9)$$

Llamando Ω al dominio de R^2 acotado por las anteriores fronteras.

Las variables Ancho_pote, Alto_Banda, Alto_pote son constantes conocidas, y Φ es una función desconocida a priori, que define la frontera libre, y que se supondrá, por lo menos, C^2.

4.2.4 Condiciones de Frontera

Las condiciones de frontera del problema son las siguientes:

$$\vec{u}\big|_{\Gamma basepote} = \vec{0} \qquad (4.\ 10)$$

$$\vec{u}\big|_{\Gamma banda} = \vec{V}_{banda} \qquad (4.\ 11)$$

$$\vec{u}\big|_{\Gamma paredpote} = \vec{0} \qquad (4.\ 12)$$

$$\left.\frac{\partial \vec{u}}{\partial n}\right|_{\Gamma libre} = 0 \qquad (4.\ 13)$$

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

$$F_t\big|_{\Gamma libre} = 0 \qquad (4.\ 14)$$

$$F_n\big|_{\Gamma libre} = 2\sigma\kappa - F_{chorro} \qquad (4.\ 15)$$

La justificación de estas condiciones de contorno es la siguiente:

- *(4.10):* En la base del pote la velocidad del fluido es nula
- *(4.11):* Por la hipótesis *(2)*, la velocidad en Γ_{banda} debe ser igual a V_{banda}, la cual es una condición de no deslizamiento.
- *(4.12):* No existe velocidad del fluido en la pared del pote.
- *(4.13):* No existe flujo atravesando la frontera libre.
- *(4.14):* Se ha supuesto que la frontera libre Γ_{libre} es independiente del tiempo. Por lo tanto la componente tangencial de la densidad de fuerza superficial sobre Γ_{libre} tiene que ser nula, ya que si no fuera nula, se produciría una deformación en la frontera, y por ende una contradicción con la hipótesis de que Γ_{libre} no cambia con el tiempo.
- *(4.15):* Componente normal de la densidad de fuerzas en la frontera libre.

En este problema se tienen dos medios continuos cuya interfaz es una delgada capa de transición, tan delgada que es posible aproximarla por una curva. Como los medios son de diferente naturaleza, existe una discontinuidad en la componente normal de la fuerza superficial en cada punto de la interfaz, proporcional a la tensión superficial de la misma.

Supóngase que dicha interfaz es una curva de la forma $\{x = \Phi(y)\}$, en un dominio Ω en R^2. Llamando (I) y (II) a los medios continuos, y tomando la normal exterior a la superficie apuntando hacia (II). Un esquema del sistema considerado se muestra en la siguiente *Figura 4.1*:

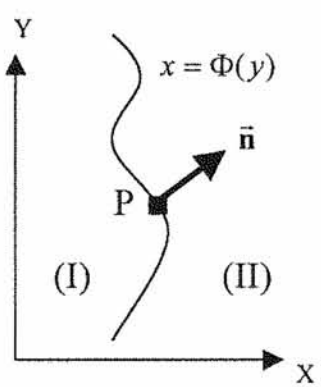

Figura 4. 1 – Esquema de la interfase zinc-aire

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Sea T_I el tensor de esfuerzos del medio (I) (fluido de zinc) y T_{II} su equivalente para el medio (II) (aire).

Se denominan *fuerzas superficiales* sobre un elemento de fluido a aquéllas que actúan debido a la interacción de un elemento con los elementos vecinos. En un elemento de superficie en la frontera se considerará la densidad superficial de fuerzas como la suma total de fuerzas internas en dicho elemento. A la densidad superficial de fuerzas se le llama también esfuerzo superficial.

Consideremos un elemento de volumen con frontera S. Sea ∂S un elemento de superficie y n la normal exterior unitaria en dicho elemento. Sobre ∂S existe una fuerza superficial neta, cuya densidad denotaremos por $\bar{t}$.

La fuerza superficial en un punto P de la curva en dirección normal es :

$$n \cdot (\bar{t}_I - \bar{t}_{II}) = n \cdot (T_I n - T_{II} n) \qquad (4.\ 16)$$

Por la hipótesis *(8)*, el comportamiento mecánico de la interfaz es como el de una membrana elástica. Esta condición es la característica física más importante de la interfaz entre los medios continuos considerados, ya que permite estimar su energía potencial en términos de la deformación que sufre debido a la fuerza normal aplicada. La energía potencial será proporcional a la longitud de la región deformada. Por otro lado, este cambio debe ser igual al trabajo realizado por la fuerza neta normal en la frontera libre. Esto nos lleva a la ecuación:

$$n \cdot (T_I n - T_{II} n) = 2\sigma\kappa \qquad (4.\ 17)$$

para todo punto de Γ_{libre}

En este problema, se sabe que el medio (II) es un fluido ideal y que el gradiente de presión es constante en cada punto e igual a la fuerza normal ejercida por el chorro acabador, por lo que:

$$n \cdot T_{II}\, n\big|_{\Gamma libre} = -F_{chorro} \qquad (4.\ 18)$$

De donde se obtiene la condición de frontera:

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

$$F_n\big|_{\Gamma libre} = 2\sigma\kappa - F_{chorro} \qquad (4.\ 19)$$

De geometría diferencial se sabe que $\kappa = -\frac{1}{2}\nabla_s n$, donde ∇_s es el operador de divergencia de la superficie. Por lo que la condición *(4.15)*, puede ser escrita:

$$F_n\big|_{\Gamma libre} = -F_{chorro} - \sigma\nabla_s \cdot n \qquad (4.\ 20)$$

que será la nueva condición de frontera.

Se utilizará la notación cartesiana tensorial que implica sumas sobre los índices y "," representa diferenciación con respecto a la posición. Con esta notación el problema puede ser escrito de la siguiente forma:

Masa:

$$u_{i,i} = 0 \qquad (4.\ 21)$$

Cantidad de movimiento:

$$\rho u_j u_{i,j} = \sigma_{ij,j} + g_i \qquad (4.\ 22)$$

Donde u_i es la componente de la velocidad en la dirección de x_i, g_i la fuerza de la gravedad y σ_{ij} es el tensor de tensiones. Con la anterior notación, el tensor de tensiones se escribe:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu(u_{i,j} + u_{j,i}) \qquad (4.\ 23)$$

donde p es la presión y μ la viscosidad absoluta del fluido. Sustituyendo esta ecuación en la de la cantidad de movimiento, se tiene que la siguiente ecuación:

$$\rho u_j u_{i,j} = -p_{,i} + \rho g_i + \mu(u_{i,j} + u_{j,i})_{,j} \qquad (4.\ 24)$$

Ecuación del calor:

$$\rho c_p u_j T_{,j} = -(-KT_j)_{,j} \qquad (4.\ 25)$$

Las condiciones de frontera serán las ecuaciones *(4.10)*, *(4.11)*, *(4.12)*, *(4.13)* y *(4.14)*; a las que se les unirá la *(4.20)*, y:

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

$$T|_{\Gamma basepote} = T_{pote} \tag{4. 26}$$

$$T|_{\Gamma banda} = T_{banda} \tag{4. 27}$$

$$\vec{u}|_{\Gamma paredpote} = T_{pote} \tag{4. 28}$$

$$K \frac{\partial T}{\partial n}\bigg|_{\Gamma libre} = T_{ext} \tag{4. 29}$$

Transformando la ecuación *(4.20)* utilizando la propiedad geométrica de la curvatura media de una superficie:

$$(\nabla_s \cdot n)n = -\frac{\partial \tau}{\partial l} \tag{4. 30}$$

donde τ es el vector tangencial asociado con n y l es la longitud de arco. Esto es, la curvatura de la línea es proporcional a la razón de cambio de la dirección del vector tangencial. Por tanto la ecuación *(4.20)* se convierte en:

$$F_n n_i = -F_{chorro} n_i - \frac{\partial \tau_i}{\partial l} \tag{4. 31}$$

4.2.5 Formulación Débil del Problema

4.2.5.1 Tratamiento de la Superficie Libre:

En la simulación numérica de los problemas con superficie libre, se pueden distinguir tres procedimientos para solucionar el problema:

1. Se fija un mallado en el espacio y se desarrollan técnicas especiales para mover la frontera libre a través del mallado.
2. Se utiliza un mallado que se mueve en el espacio y se realiza un ciclo con tres pasos:
   - Se supone una forma de la superficie libre.
   - Se calcula el campo de flujo dentro de esa forma fija resolviendo las ecuaciones y negando una de las condiciones frontera.
3. Se calcula la forma de la frontera libre imponiendo la condición frontera que se había negado en el apartado anterior.
4. Este proceso se repite hasta conseguir la tolerancia deseada.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Se utiliza un mallado que se mueve en el espacio pero se elimina la iteración sucesiva entre la posición de la frontera libre y las variables del campo, introduciendo la posición de los nodos en la superficie libre directamente como grados de libertad. Se tiene entonces que resolver un sistema de ecuaciones no lineales para calcular la posición de la frontera libre y las variables del campo en las nuevas posiciones nodales. Este sistema se resolverá con un método iterativo tipo Newton-Raphson.

Se utilizará esta última forma de resolver el problema de frontera libre. Sin embargo, al elegir el procedimiento de un mallado que se mueve en el espacio, se tiene el inconveniente, de que los elementos pueden distorsionarse si se permiten movimientos generales de los nodos. Se tendrá, por lo tanto, que limitar el movimiento de los nodos, de tal forma que la deformación del mallado pueda ser incorporada eficazmente.

Para evitar la deformación de los elementos y mantener la densidad de elementos original, se propagará el movimiento de los nodos de la frontera a nodos del interior del dominio

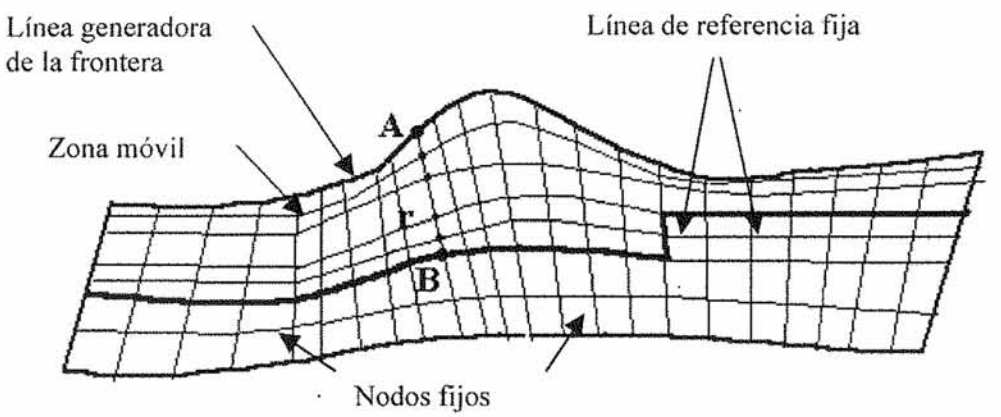

Figura 4. 2 – Dibujo esquemático de la frontera libre.

Antes de desarrollar la formulación débil del problema, se va a desarrollar un método para caracterizar el movimiento de la superficie libre. Se va a considerar las condiciones en la frontera libre con más detalle.

Las condiciones *(4.14)* y *(4.20)*, consisten en asignar la fuerza superficial que se ejerce sobre la frontera libre. Esta condición es una condición frontera válida para un problema de Stokes en un dominio fijo. Por otra parte la condición *(4.13)* $\frac{\partial u}{\partial n} = 0$ podría considerarse como una condición de frontera tipo Dirichlet en la dirección normal. Para un problema de Stokes con dominio fijo, no se pueden imponer al mismo tiempo las condiciones *(4.13)*, *(4.14)* y *(4.20)*. Para poder imponer estas condiciones simultáneamente en la frontera libre, se introduce un

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

nuevo grado de libertad en cada nodo de la superficie móvil. El valor de este grado de libertad en cada nodo permite determinar la posición del nodo dentro de la región y es una parte integral de la representación de la superficie libre. Se podría considerar como grado de libertad la altura del nodo respecto a un plano de referencia fijo. Sin embargo, esta elección no es eficaz en problemas en los que la geometría es compleja.

Otra alternativa, es elegir una representación paramétrica de la línea generadora de la frontera. Cada nodo sobre la superficie libre (A) es el extremo de un segmento recto que empieza en algún nodo (B) dentro del mallado. El nodo (B) y todos los nodos que estén por debajo de él se consideran como fijos en el espacio. El nodo (A) permanecerá en la recta definida por AB en la simulación y todos los nodos de la recta AB, son libres de moverse. La recta AB se representa paramétricamente como:

$$x = \alpha_x r + \beta_x \qquad (4.\ 32)$$
$$y = \alpha_y r + \beta_y$$

donde si r=0 tenemos el nodo B y si r=1 el nodo A. Por lo tanto el candidato a ser el grado de libertad de la superficie libre en el nodo A es el valor del parámetro r. Dado un valor de r, la nueva posición del nodo se obtiene fácilmente sustituyendo el valor de r en las anteriores ecuaciones. Esta representación paramétrica también nos permite mantener el aspecto de la proporción de los nodos en el intervalo AB. El aspecto de la proporción es el valor inicial del parámetro r en cada uno de los nodos de AB. Así una vez que un nuevo valor de r ha sido computado, r_A, el nuevo valor de r en cada uno de los otros nodos de la recta es este valor multiplicado por el valor inicial r de cada nodo. Esto es también importante para darse cuenta de que las líneas generadoras de la frontera son independientes unas de otras.

Ahora considerando la representación en elementos finitos de un segmento recto sobre la frontera libre. Este segmento va a ser el lado de algún elemento finito, y sobre él van a estar N nodos, dependiendo del tipo de elemento finito con el que estemos trabajando. Por comodidad se supone que sólo hay dos nodos. Sean $C(x_1,y_1)$ y $D(x_2,y_2)$ las coordenadas de dichos nodos y (α_{x1},β_{x1}), (α_{y1},β_{y1}) y (α_{x2},β_{x2}), (α_{y2},β_{y2}) los coeficientes de la representación paramétrica de las líneas generadoras que unen C y D con la línea de referencia fija. Entonces la superficie libre se puede aproximar por:

$$x = \sum_{i=1}^{2} x_i \chi_i(s) = \sum_{i=1}^{2} (\alpha_{x_i} r_i + \beta_{x_i}) \chi_i(s) \qquad (4.\ 33)$$
$$y = \sum_{i=1}^{2} y_i \chi_i(s) = \sum_{i=1}^{2} (\alpha_{y_i} r_i + \beta_{y_i}) \chi_i(s)$$

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

donde $\chi_i(s)$ son las funciones paramétricas.

4.2.5.2 Formulación Débil

Sean V,P,Q y R los espacios de velocidades, presiones, temperaturas y grados de libertad admisibles, respectivamente. Dichos espacios se definen respectivamente:

$$V = \left\{ \vec{\varphi} \in (H^1(\Omega))^2 : \vec{\varphi} = \hat{u} \text{ en } \partial\Omega_D \right\} \tag{4. 34}$$

$$P = \left\{ \psi \in L^2(\Omega) : \int_\Omega \psi dx = 0 \right\} \tag{4. 35}$$

$$Q = \left\{ \phi \in H^1(\Omega) : \phi = \hat{T} \text{ en } \partial\Omega_D \right. \tag{4. 36}$$

$$R = \left\{ \chi \in H^1(\partial\Omega_F) \right. \tag{4. 37}$$

Se utilizará el *Método de Elementos Finitos de Galerkin* (MEFG). Para ello se multiplicarán las ecuaciones de conservación de la masa, del momento lineal y de la energía por funciones test, y se integrará en el dominio de definición.

$$\int_\Omega u_{j,j}\psi d\Omega = 0 \quad \int_\Omega \rho u_j u_{i,j}\varphi_i d\Omega = -\int_\Omega p_{,i}\varphi_i d\Omega + \mu \int_\Omega (u_{i,j} + u_{j,i})_{,j}\varphi_i d\Omega + \int_\Omega \rho g_i \varphi_i d\Omega \tag{4. 38}$$

$$\int_\Omega \rho c_p u_i T_{,j}\phi d\Omega = -\int_\Omega -(KT_{,j})_{,j}\phi d\Omega \tag{4. 39}$$

con i=1,2

Aplicando el Teorema de Green a la ecuación del momento y de la energía, se obtiene:

$$-\int_\Omega \rho u_j u_{i,j}\varphi_i d\Omega + \int_\Omega p\varphi_{i,i} d\Omega - \mu \int_\Omega (u_{i,j} + u_{j,i})\varphi_{i,j} d\Omega + \int_\Omega \rho g_i \varphi_i d\Omega \tag{4. 40}$$

$$-\int_\Gamma (-p\delta_{ij} + \mu(u_{i,j} + u_{j,i}) n_j \varphi_i d\Gamma = 0$$

$$\int_\Omega \rho c_p u_i T_{,j}\phi d\Omega = -\int_\Omega KT_{,j}\phi_{,j} d\Omega + \int_{\Gamma libre} KT \cdot n_j \phi d\Gamma \tag{4. 41}$$

Sustituyendo la definición del tensor de tensiones:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu(u_{i,j} + u_{j,i}) \tag{4. 42}$$

en la ecuación del momento, se obtiene:

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

$$-\int_{\Omega}\rho u_j u_{i,j}\varphi_i d\Omega+\int_{\Omega}p\varphi_{i,j}d\Omega-\mu\int_{\Omega}(u_{i,j}+u_{j,i})\varphi_{i,j}d\Omega-\int_{\Gamma}\sigma_{ij}n_j\varphi_i d\Gamma+\int_{\Omega}\rho g_i\varphi_i d\Omega=0 \quad (4.\ 43)$$

Imponiendo las condiciones de frontera, estas ecuaciones pueden escribirse:

$$-\int_{\Omega}\rho u_j u_{i,j}\varphi_i d\Omega+\int_{\Omega}p\varphi_{i,j}d\Omega-\mu\int_{\Omega}(u_{i,j}+u_{j,i})\varphi_{i,j}d\Omega-\int_{\Gamma libre}(F_n n_i-F_t t_i)\varphi_i d\Gamma+\int_{\Omega}\rho g_i\varphi_i d\Omega=$$

$$=-\int_{\Omega}\rho u_j u_{i,j}\varphi_i d\Omega+\int_{\Omega}p\varphi_{i,j}d\Omega-\mu\int_{\Omega}(u_{i,j}+u_{j,i})\varphi_{i,j}d\Omega-\int_{\Gamma libre}(F_{chorro}n_i-\frac{d\tau_i}{dl})\varphi_i d\Gamma+\int_{\Omega}\rho g_i\varphi_i d\Omega=0$$

$$\int_{\Omega}\rho c_p u_i T_{,j}\phi d\Omega=-\int_{\Omega}KT_{,j}\phi_{,j}d\Omega+\int_{\Gamma libre}T_{extl}\phi d\Gamma \quad (4.\ 44)$$

Todas las integrales en estas ecuaciones son las integrales estándar obtenidas de la aplicación del MEFG a las ecuaciones de Navier-Stokes, con la excepción de la integral:

$$\int_{\Gamma libre}(F_{chorro}n_i-\frac{d\tau_i}{dl})\varphi_i d\Gamma \quad (4.\ 45)$$

Si se aplica el Teorema de Green a este término obtenemos:

$$\int_{\Gamma libre}\frac{d\tau_i}{dl}\varphi_i d\Gamma=-\int_{\Gamma libre}\tau_i\frac{\partial\varphi_i}{\partial i}d\Gamma+\left[\tau_i\varphi_i\right]_{l_1}^{l_2} \quad (4.\ 46)$$

Este procedimiento tiene la ventaja de eliminar la primera derivada del vector tangente, lo cual elimina la necesidad de derivadas segundas de las funciones base χ_i.

Si el último término de la anterior expresión se escribe:

$$\left[\tau_i\varphi_i\right]_{l_1}^{l_2}=\xi_i\varphi_i\big|_{l_2}+\xi_i\varphi_i\big|_{l_1} \quad (4.\ 47)$$

Este término representa la condición frontera en dos extremos de la superficie libre; l_1 y l_2 son los extremos de la frontera Γ_{libre} y ξ_i en el lado derecho de la ecuación son las componentes de vector tangente a Γ_{libre} en cada punto.

La condición de que no haya flujo a través de la superficie libre sirve para completar el sistema de ecuaciones de elementos finitos:

$$\int_{\Gamma libre}u_n\chi d\Gamma=\int_{\Gamma libre}(n_x u_x+n_y u_y)\chi d\Gamma=0 \quad (4.\ 48)$$

La formulación débil bidimensional para determinar (u,p,T,r) es:

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Encontrar $(\vec{u}, p, T, r) \in \mathrm{V} \times \mathrm{P} \times \mathrm{Q} \times \mathrm{R}$ tal que :

$$\int_{\Omega} u_{j,j}\psi d\Omega = 0 \qquad \forall \psi \in \mathrm{P}$$

$$\int_{\Omega}(-\rho u_j u_{i,j}\varphi_i + p\varphi_{i,i} - \mu(u_{i,j} + u_{j,i})\varphi_{i,j} - \rho g_i \varphi_i)d\Omega =$$

$$\int_{\Gamma libre}(F_{chorro} n_i)\varphi_i d\Gamma + \int_{\Gamma libre}\tau_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial i} d\Gamma - [\tau_i \varphi_i]_{l_1}^{l_2} \qquad \forall \bar{\varphi} \in \mathrm{V}$$

$$\int_{\Omega}\rho c_p u_i T_{,j}\phi d\Omega + \int_{\Omega} K T_{,i}\phi_{,i} d\Omega = \int_{\Gamma libre} T_{exit}\phi d\Gamma \qquad \forall \phi \in \mathrm{Q}$$

$$\int_{\Gamma libre} u_n \chi d\Gamma = \int_{\Gamma libre}(n_x u_x + n_y u_y)\chi d\Gamma = 0 \qquad \forall \chi \in \mathrm{R}$$

4.2.6 Simplificación de las Ecuaciones

Las anteriores ecuaciones pueden ser simplificadas atendiendo a las hipótesis formuladas anteriormente. Así haciendo uso de la hipótesis *(4)*, el término de convección en la ecuación de conservación del movimiento, $\rho u_j u_{i,j}$, puede ser despreciado, y haciendo uso de la hipótesis *(10)*, el término de convección térmica, $\rho c_p u_i T_{,j}$, también puede ser despreciado.

Por tanto, la formulación débil del problema será:

Encontrar $(\vec{u}, p, T, r) \in \mathrm{V} \times \mathrm{P} \times \mathrm{Q} \times \mathrm{R}$ tal que :

$$\int_{\Omega} u_{i,i}\psi d\Omega = 0 \qquad \forall \psi \in \mathrm{P}$$

$$\int_{\Omega}(p\varphi_{i,i} - \mu(u_{i,j} + u_{j,i})\varphi_{i,j} - \rho g_i \varphi_i)d\Omega = \int_{\Gamma libre}\left[(F_{chorro} n_i)\varphi_i + \tau_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial i}\right] d\Gamma - [\tau_i \varphi_i]_{l_1}^{l_2} \qquad \forall \bar{\varphi} \in \mathrm{V}$$

$$\int_{\Omega} K T_{,i}\phi_{,i} d\Omega = \int_{\Gamma libre} T_{exit}\phi d\Gamma \qquad \forall \phi \in \mathrm{Q}$$

$$\int_{\Gamma libre} u_n \chi d\Gamma = \int_{\Gamma libre}(n_x u_x + n_y u_y)\chi d\Gamma = 0 \qquad \forall \chi \in \mathrm{R}$$

sumando la ecuación del momento lineal en *i=1,2*, se obtiene:

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Encontrar $(\vec{u}, p, T, r) \in V \times P \times Q \times R$ tal que :

$$\int_{\Omega} \mathrm{div}\vec{u} q d\Omega = 0 \qquad \forall q \in P$$

$$\int_{\Omega} (p div\vec{v} - \mu \nabla \vec{u} : \nabla \vec{v}) d\Omega = \int_{\Omega} \rho \vec{g} \vec{v} d\Omega + \int_{\Gamma libre} [(F_{chorro} \vec{n})\vec{v} + \vec{\tau} \nabla \vec{v}] d\Gamma - [\vec{\tau} \vec{v}]_{l_1}^{l_2} \qquad \forall \vec{v} \in V$$

$$\int_{\Omega} K \nabla T \nabla S d\Omega = \int_{\Gamma libre} T_{exit} S d\Gamma \qquad \forall S \in Q$$

$$\int_{\Gamma libre} u_n m d\Gamma = \int_{\Gamma libre} (n_x u_x + n_y u_y) m d\Gamma = 0 \qquad \forall m \in R$$

Notación: Producto doblemente contraído:

$$\nabla \vec{u} : \nabla \vec{v} = \sum_{i=1,2} \nabla u_i \nabla v_i$$

Con las condiciones de contorno:

$$\vec{u}\big|_{\Gamma basepote} = \vec{0} \qquad F_n\big|_{\Gamma libre} = -F_{chorro} - \sigma \nabla_s \cdot n$$

$$\vec{u}\big|_{\Gamma banda} = \vec{V}_{banda} \qquad T\big|_{\Gamma basepote} = T_{pote}$$

$$\vec{u}\big|_{\Gamma paredpote} = \vec{0} \qquad T\big|_{\Gamma banda} = T_{banda}$$

$$\left.\frac{\partial \vec{u}}{\partial n}\right|_{\Gamma libre} = 0 \qquad \vec{u}\big|_{\Gamma paredpote} = T_{pote}$$

$$F_t\big|_{\Gamma libre} = 0 \qquad K \left.\frac{\partial T}{\partial n}\right|_{\Gamma libre} = T_{ext}$$

$$F_n\big|_{\Gamma libre} = 2\sigma\kappa - F_{chorro}$$

Siendo los espacios funcionales:

$$V = \left\{\vec{\varphi} \in (H^1(\Omega))^2 : \vec{\varphi} = \hat{u} \text{ en } \partial\Omega_D\right\} \qquad Q = \left\{\phi \in H^1(\Omega) : \phi = \hat{T} \text{ en } \partial\Omega_D\right.$$

$$P = \left\{\psi \in L^2(\Omega) : \int_{\Omega} \psi dx = 0\right\} \qquad R = \left\{\chi \in H^1(\partial\Omega_F)\right.$$

La solución del problema se efectuará iterativamente; en cada iteración la ecuación de la energía está desacoplada de las otras ecuaciones. Se continuará el proceso hasta obtener la convergencia deseada.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

4.3 Modelo Neuronal

Aun con las mejoras introducidas, el modelo matemático presentado en el apartado anterior incorpora algunas simplificaciones. Una aproximación alternativa al problema que soslaya la dificultad matemática inherente a la complejidad del sistema físico, es utilizar las técnicas descritas en el *capítulo 3*.

4.3.1 Planteamiento

Dado que los estudios realizados en el lado Este de la banda son extrapolables a los del lado Oeste solo se realizara el estudio para uno de los lados.

Las variables disponibles son las siguientes:

Etiqueta	*Descripción de la Variable*
PC718T	Presión de soplado de la cuchilla del Este.
SIA80	Velocidad de la línea de galvanizado (m/min).
TT428	Temperatura de la banda a la entrada al pote de galvanizado (°C).
TE628R	Temperatura del pote de galvanizado (°C).
SMA80	Corriente en la brida n°3.
SCA80	Tensión en la sección centro.
DIN	Recubrimiento en la cara inferior de la banda, zona Norte.
DIC	Recubrimiento en la cara inferior de la banda, zona Centro.
DIS	Recubrimiento en la cara inferior de la banda, zona Sur.
ANCHO	Ancho de la banda a galvanizar.
INF-X	Posición en el eje horizontal de la cuchilla.
INF-Y	Posición en el eje vertical de la cuchilla.
ROB	Recubrimiento objetivo.

Tabla 4. 1 - Variables disponibles en la zona de proceso de galvanizado.

El análisis de los datos se enfrenta a un hecho habitual en los casos de resolución de problemas industriales: la limitación en la diversidad de los datos – restringida al número de variables que la empresa maneja- y la incertidumbre acerca de su validez.

En la producción de bobinas de acero galvanizadas, son rechazadas aquellas que tienen un recubrimiento (medido en gr/m^2) inferior al deseado, por lo que, en general, tanto los modelos como las acciones directas de los operadores mantienen un exceso de recubrimiento. Este exceso supone una pérdida de material de recubrimiento que representa

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

un coste considerable para la empresa. Los tipos de recubrimientos empleados se muestran en la tabla adjunta.

Designación	Revestimientos Medios (gr/m^2)		
	Una muestra	Tres muestras	
	Mínimo	Mínimo	Objetivo
EGA	85	100	105
EGB	170	200	210
EGC	235	275	290

Tabla 4. 2 Tipos de revestimientos medios empleados.

De entre todos los tipos de revestimiento contemplados solo se someterán a estudio los más frecuentemente empleados, es decir EGA, EGB, EGC

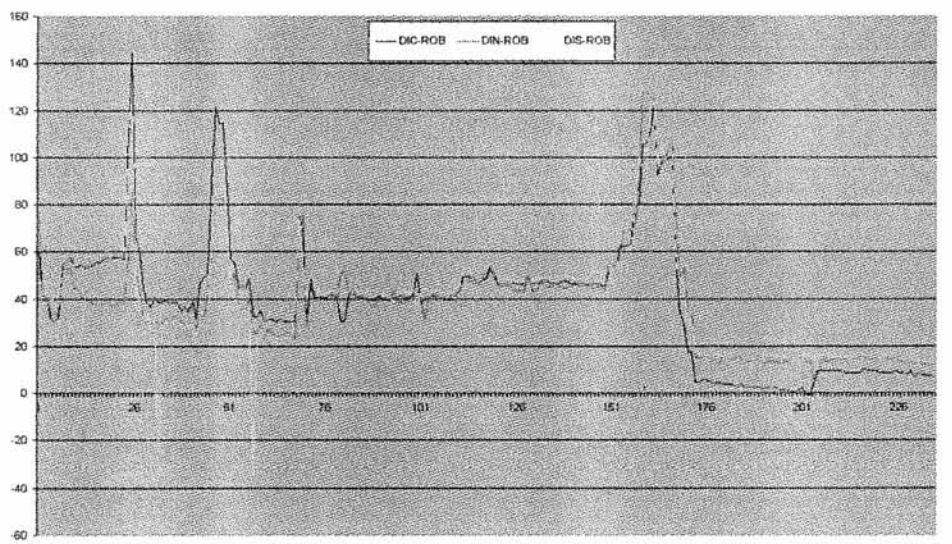

Figura 4. 3 – Errores de recubrimiento para la zona inferior de la banda (gr/m^2), para recubrimientos ° (52 gr/m^2).

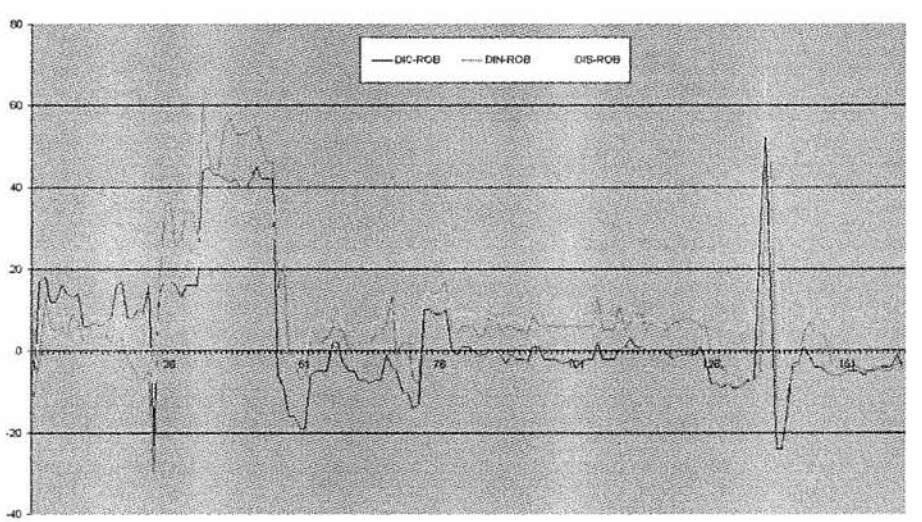

Figura 4. 4 – Errores de recubrimiento para la zona inferior de la banda (gr/m^2), para recubrimientos (105 gr/m^2).

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

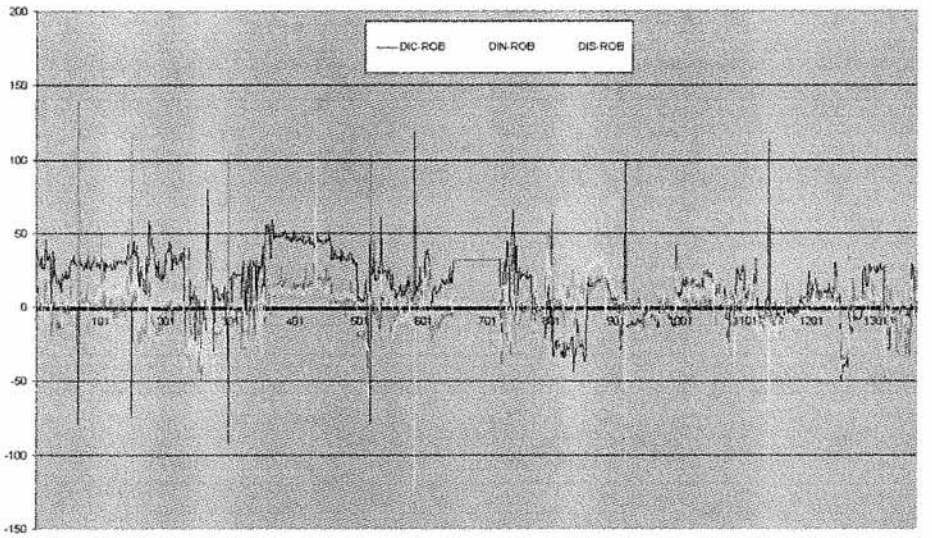

Figura 4. 5 – Errores de recubrimiento para la zona inferior de la banda (gr/m^2), para recubrimientos (145 gr/m^2).

Las *Figuras 4.3*, *4.4* y *4.5* muestran el error de recubrimiento para la zona inferior de la banda, pudiendo constatarse que el error es mayor para recubrimientos bajos (EGA, 52 gr/m^2), que para recubrimientos altos (EGC, 145 gr/m^2).

Como puede apreciarse en las figuras, los errores de recubrimiento alcanzan en algunos casos valores muy altos, con lo que el desperdicio de zinc es considerable. Son estos errores los que se pretenden minimizar con el sistema desarrollado en este trabajo.

Para la realización de este estudio se parte de 1760 muestras, componiéndose cada una de ellas de 13 variables diferentes de la zona de proceso de una línea de galvanizado.

Para que los resultados se puedan aplicar a nuevos casos, además de los utilizados en el estudio, es preciso considerar ciertas restricciones:

1. Se considera válida para el estudio cualquier bobina procesada por la línea, sea cual sea su ancho, espesor, longitud, velocidad de paso o recubrimiento.
2. No se tienen en cuenta los casos en los que los errores pueden ser causados por una circunstancia ajena al normal funcionamiento de la instalación.
3. Se eliminan aquellos casos en los que existen datos incompletos, sin considerar la posibilidad de utilizar algoritmos para interpolar los valores que faltan en función de los anteriores en el tiempo, puesto que se incorporarían errores muy difíciles de detectar.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

4.3.2 Determinación del Espacio de Búsqueda

Se pretende determinar aquellas variables que tienen una mayor influencia en la calidad del producto final, entendiendo por calidad un recubrimiento uniforme a lo largo de la banda, y nunca inferior al recubrimiento objetivo.

4.3.2.1 Selección de Variables

Dado que los resultados que se puedan obtener para una de las cuchillas son extrapolables a su homóloga en el lado contrario de la banda, se limitará el estudio a las variables relacionadas con el sector Este, y por tanto con el recubrimiento inferior de la banda.

Teniendo esto en cuenta las variables objeto de este estudio, serán las de la *Tabla 4.1* a excepción de la variable que refleja la temperatura de la banda a la entrada en el pote de galvanizado, que se descartó ante la imposibilidad de obtener datos.

Estas variables presentan el siguiente comportamiento estadístico:

	PC718T	*SIA80*	*TE628R*	*SMA80*	*SCA80*
Promedio	92.94	77.54	475.49	1.02	246.51
Moda	94	98	449	-1	220.6
Mediana	94	91.8	463	-1	227.1
Máximo	94	113.1	568	20	461.7
Mínimo	90	-0.1	438	-1	29.7
Desv. Típica	1.76686	27.0167946	29.8954182	4.0677904	61.9386535

Tabla 4. 3 - Comportamiento estadístico de las variables presión cuchilla este (PC718T), velocidad de la línea (SIA80), temperatura del pote (TE628R), corriente en la brida (SMA80), tensión en el centro (SCA80).

	DIN	*DIC*	*DIS*	*ANCHO*	*INF-X*	*INF-Y*
Promedio	138.55	144.52	140.47	1224.88	541.14	710.07
Moda	158	177	158	1266	539	712
Mediana	145	149	146	1265	542	713
Máximo	284	264	1250	1410	672	829
Mínimo	48	44	18	160	447	600
Desv. Típica	24.0041	30.01204	31.44503	94.3641395	21.9548361	21.8945187

Tabla 4. 4 - Recubrimiento inferior norte (DIN), recubrimiento inferior centro (DIC) recubrimiento inferior sur (DIS), ancho de la bobina (ANCHO), distancia cuchilla-banda en el eje X (INF-X), distancia cuchilla-banda en el eje Y (INF-Y)

Se ha realizado un estudio de correlación entre las diferentes variables, cuyos resultados se muestran en el *Anexo I*. La matriz de correlación permite comprobar que no hay una relación lineal suficientemente importante entre variables independientes que permita desechar alguna por estar implícitamente contenida en otra. Sin embargo, pudiera ocurrir que existiese relación multivariante, algo que este método no es capaz de detectar.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Debe destacarse que las variables que presentan mayores índices de correlación lineal sobre los espesores de recubrimiento son el ancho de la banda (0.33) y la presión de soplado de la cuchilla del Este (-0.34). Obviamente, el recubrimiento objetivo presenta una fuerte dependencia lineal (0.77), lo que era de esperar.

A la vista de los resultados obtenidos con este método se deduce que no es posible eliminar ninguna variable por estar implícitamente contenida en otra.

4.3.2.2 Selección Basada en Criterios Estadísticos.

La principal fuente de errores en los datos se debe a la pérdida o transposición de un dígito durante su adquisición y transporte, por lo que se definen unos rangos de variación aceptables para cada variable.

En el caso de los recubrimientos característicos de la banda, se tomará como referencia además de criterios estadísticos los recubrimientos objetivo.

- Rangos aceptados de variación

  Para el caso de presiones en las cuchillas los errores son fácilmente detectables pues el rango de variación de dichas variables es pequeño y discreto. La velocidad en la línea tendrá un máximo y mínimo que vendrá determinado por el proceso

  Las variables temperatura del pote (TE628R), corriente en la brida (SMA80), y tensión en el centro (SCA80) también tienen unos rangos de variación definidos por el proceso.

  Valores negativos de corriente en la brida se dan cuando es la banda la que arrastra a la brida (nótese que para mantener tensa la banda la brida debe girar a mayor velocidad que esta). No se trata pues de valores erróneos, es mas, se dan con relativa frecuencia debido a las pequeñas oscilaciones de velocidad frecuentes en la línea.

  Para el caso de los recubrimientos, los valores extremos de aceptación se definen teniendo en cuenta criterios estadísticos y espesores objetivos. El ancho de la banda tiene una variación fijada por el proceso de laminación.

  La distancia de las cuchillas a la banda (eje X) y a la base del pote (eje Y) variará según las necesidades de recubrimiento en combinación con el resto de las variables por lo que sus rangos limite serán los más difíciles de determinar y se hará, además de por procedimientos estadísticos basándose en la experiencia.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Todos estos criterios se reflejan en la *Tabla 4.6* donde se representan los rangos máximos y mínimos de aceptación de las variables mencionadas.

	PC718T	PC718D	SIA80	TE628R	SMA80	SCA80	DIN	DIC	DIS	ANCHO	INF-X	INF-Y
Máximo	94	92	113	568	20	407	284	225	271	1398	672	829
Mínimo	90	82	13.5	438	-1	55.6	48	48	59	811	447	600

Tabla 4. 5 - Rangos aceptables de variación para la presión en las cuchillas.

- Comportamiento estadístico de los datos seleccionados.

	PC718T	SIA80	TE628R	SMA80	SCA80	DIN	DIC	DIS	ANCHO	INF-X	INF-Y
Promedio	92.9	79.2	475	1.04	248	138	144	140	1227	541	711
Moda	94	98	449	-1	221	150	177	150	1266	558	712
Mediana	94	92.6	463	-1	227	144	149	146	1265	544	713
Máximo	94	113	568	20	407	284	225	271	1398	672	829
Mínimo	90	13.5	438	-1	55.6	48	48	59	811	447	600
Desviación Típica	1.78	24.8	29.7	4.11	57.3	24.1	29.6	22.3	89	22.1	9.84

Tabla 4. 6 - Comportamiento estadístico de las variables presión cuchilla norte (PC718T), presión cuchilla sur (PC718D), velocidad de la línea (SIA80), temperatura del pote (TE628R), corriente en la brida (SMA80), tensión en el centro (SCA80) Recubrimiento superior norte (DSN), recubrimiento superior centro (DSC), recubrimiento superior sur (DSS), recubrimiento inferior norte (DIN), recubrimiento inferior centro (DIC) recubrimiento inferior sur (DIS), Ancho de la bobina (ANCHO), distancia cuchilla en eje X (INF-X), distancia cuchilla en eje Y (INF-Y). Datos filtrados.

Los datos no válidos, es decir que se salen de los rangos de aceptación fueron estudiados individualmente para descubrir comportamientos especiales, que pueden clasificarse en:

1. Recubrimientos excesivos y puntuales debidos al cordón de soldadura entre bandas.
2. Irregularidades superficiales de recubrimiento ocasionadas por variaciones bruscas de la posición de las cuchillas.
3. Irregularidades en el recubrimiento debido al paso de la banda por el pote de galvanizado sin que esté completamente paralela a ambas cuchillas.
4. Irregularidades superficiales de recubrimiento ocasionadas por variaciones en la presión del aire en las cuchillas.
5. Anomalías ocasionadas por defectos superficiales en la banda.
6. Anomalías achacables a una mal funcionamiento de la galga radioactiva de espesores.
7. Daños causados por los operarios durante su trabajo habitual (eliminación de las natas del pote, reposición del zinc consumido, control de la posición de las cuchillas, etc.).

Los datos correspondientes a situaciones irregulares pero no defectuosos se almacenaran para estudios posteriores.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

4.3.2.3 Selección Mediante Algoritmos.

Para optimizar el proceso de clasificación y reducir el tiempo de computación se estudiaran de forma independiente los distintos tipos de recubrimiento. Se pretende encontrar aquellas variables que contienen la información más significativa de los datos originales. Una selección de variables consta de tres pasos: a) una estrategia de búsqueda, b) un criterio de selección, y c) una condición para detener la búsqueda.

La muestra utilizada en este estudio contiene 214 datos. Previo a la aplicación de los algoritmos mostrados en el *capítulo 3*, se dividio la muestra en clases (de tres, cinco y ocho integrantes), no siendo esta división necesaria en el caso del algoritmo de splines regresivo adaptativos multivariantes (MARS).

Como variable dependiente se tomo el recubrimiento en la zona centro de la banda, excepto con el algoritmo MARS donde se realizará el estudio también para los recubrimientos norte y sur.

Los resultados se representan en forma de gráficas, en las que el eje de abcisas se muestra la influencia de cada variable, ponderada de 0 (influencia nula) a 10 (máxima influencia), frente a la variable tomada como salida. Estos resultados se pueden encontrar en forma numérica en el *Anexo II* de este trabajo.

4.3.2.3.1 Algoritmo Univariante.

Los resultados, para divisiones de los datos en 3, 5 y 8 clases, son los que se representan en la *Figura 4.6*, estando disponibles los datos numéricos de salida en el *Anexo II*.

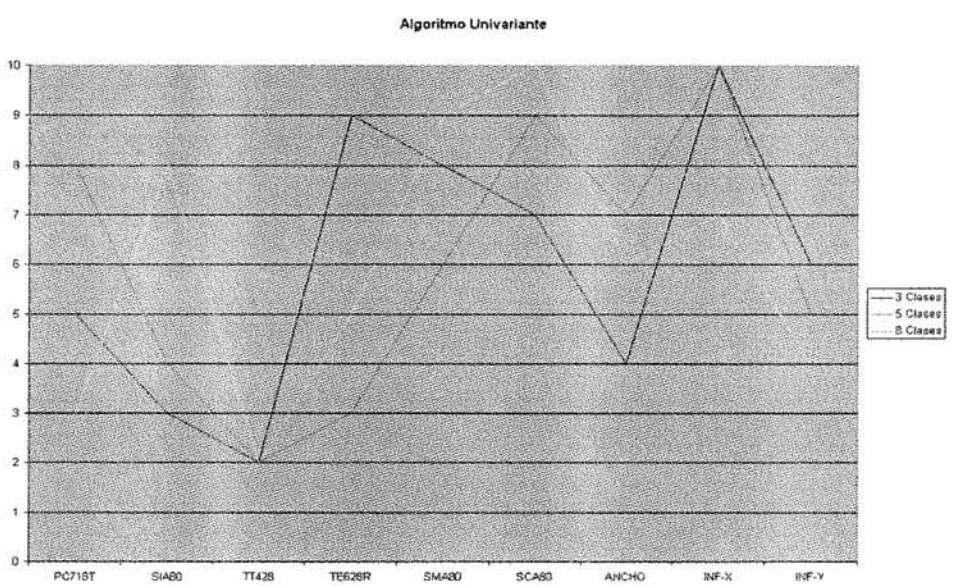

Figura 4. 6 – Clasificación de 0 a 10 de las variables según su importancia para el algoritmo Univariante

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

La gráfica permite advertir como en este algoritmo variables tales como la posición de las cuchillas (INF-X e INF-Y) y el ancho de la banda (ANCHO) pierden su importancia relativa a medida que aumenta el número de clases siendo el caso contrario, aumentan su importancia, el de las variables tensión en el centro corriente en la brida, temperatura del pote (TE628R) y velocidad de la línea (SIA80).

Debe entenderse que la variable temperatura de la banda a la entrada del pote (TT428) de la cual no se pudieron obtener datos fiables se toma como referencia de mínima importancia (influencia nula), por lo que aparece siempre y para cualquier división en clases como mínimo valor.

4.3.2.3.2 Algoritmo de Covarianza Múltiple.

Tras la aplicación del algoritmo, se observa que la velocidad de la banda (SIA80) toma mayor relevancia a medida que aumenta el numero de clases.

El algoritmo destaca como variables de mayor importancia la tensión en la sección centro (SCA80) y la posición en el eje vertical de la cuchilla (INF-Y), variando la importancia relativa del resto de las variables en función del número de clases en que se dividida la muestra.

Gráficamente el resultado de la aplicación del algoritmo para 3, 5 y 8 clases, se muestra en la *Figura 4.7.* Los datos numéricos se encuentran en el *Anexo II.*

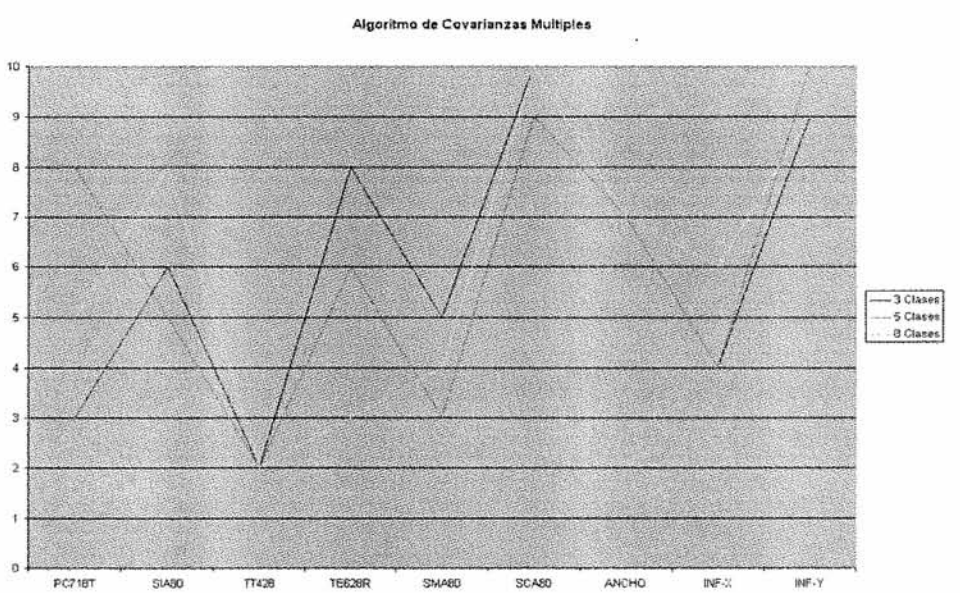

Figura 4. 7 – Clasificación de 0 a 10 de las variables según su importancia para el algoritmo Covarianzas Múltiples.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

4.3.2.3.3 Algoritmo de Mínimo Error

Se debe tener en cuenta que al tratarse de el método mas complejo y fiable su clasificación tiene un peso mayor a la hora de llevar a cabo la elección final de las variables más relevantes en la determinación del espesor del recubrimiento. Para utilizar este algoritmo, además de dividir en clases la muestra sometida a estudio, se repitió el algoritmo para uno y dos vecinos.

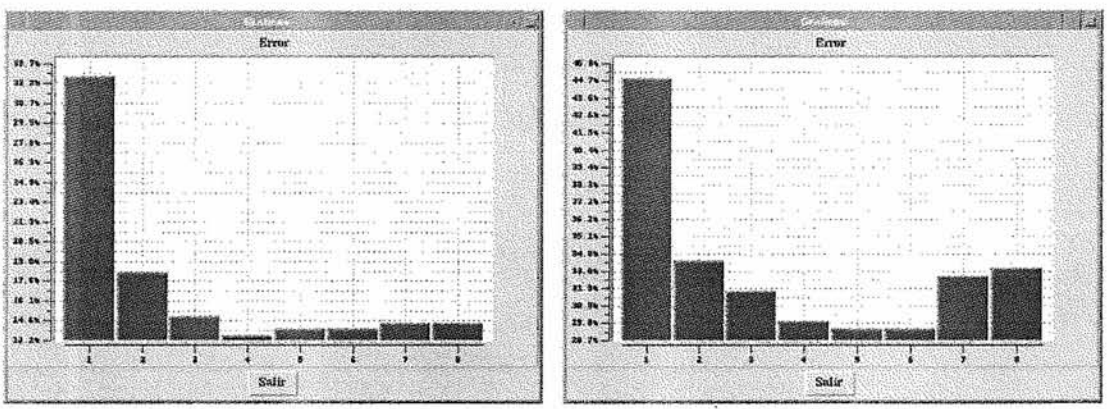

Figura 4. 8 – Ejemplo de salida gráfica del Algoritmo .

La salida gráfica del algoritmo muestra el grado de importancia relativa que tienen las variables independientes.

Como en el caso de los algoritmos anteriores la variable velocidad de la línea (SIA80) aumenta en importancia a medida que aumentan el numero de clases en que se divide la muestra, siendo el comportamiento similar tanto para un vecino como para dos.

La temperatura del pote (TE628R) crece en importancia a medida que aumenta el número de clases para el caso de un único vecino y decrece para el caso de dos. Siendo la influencia del ancho de la banda (ANCHO) la que mayor estabilidad muestra para valores elevados de influencia. Gráficamente para el caso de un único vecino (división en 3, 5 y 8 clases) el algoritmo se ordena según la *Figura 4.9* y para el caso de dos vecinos según la *Figura 4.10.*

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

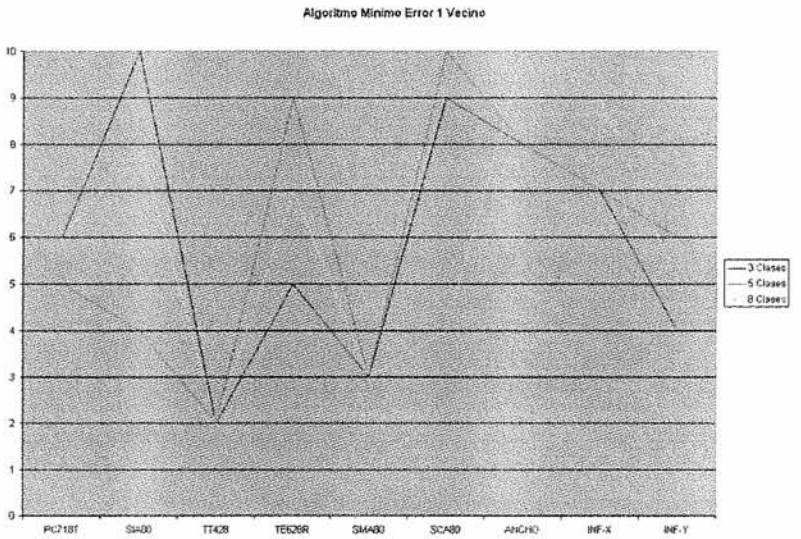

Figura 4. 9 – Clasificación de 0 a 10 de las variables según su importancia para el algoritmo Mínimo Error con un único vecino.

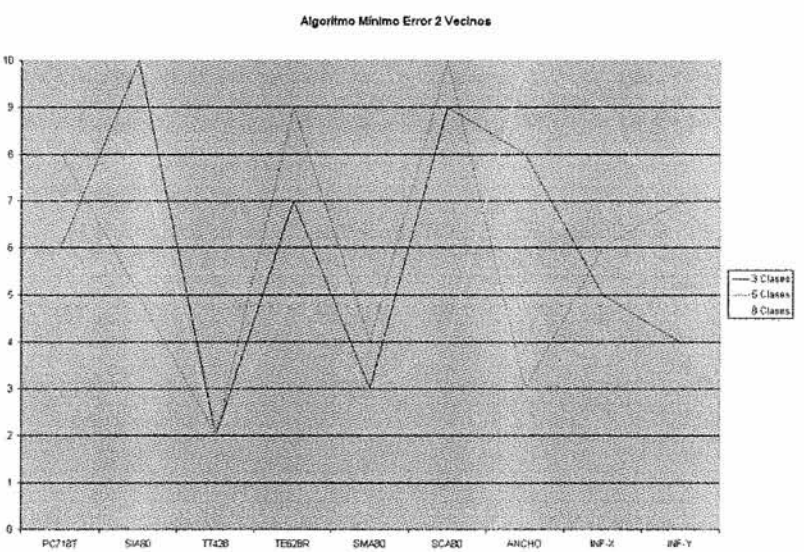

Figura 4. 10 – Clasificación de 0 a 10 de las variables según su importancia para el algoritmo Mínimo Error con dos vecinos.

4.3.2.3.4 Algoritmo Splines Regresivos Adaptativos Multivariables

El hecho de tomar como salida la variable de espesor de recubrimiento en las tres zonas de la banda obliga al algoritmo a clasificar el resto de variables en cuanto a su influencia sobre dichas salidas.

La importancia relativa de las variables del sistema sobre los espesores de recubrimiento varia ligeramente en cuanto a magnitud pero muestra como importantes a las variables tensión en la sección centro (SMA80), posición relativa de las cuchillas (INF-X y INF-Y) y velocidad de la banda (SIA80). Los resultados numéricos se muestran en el *Anexo II*.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

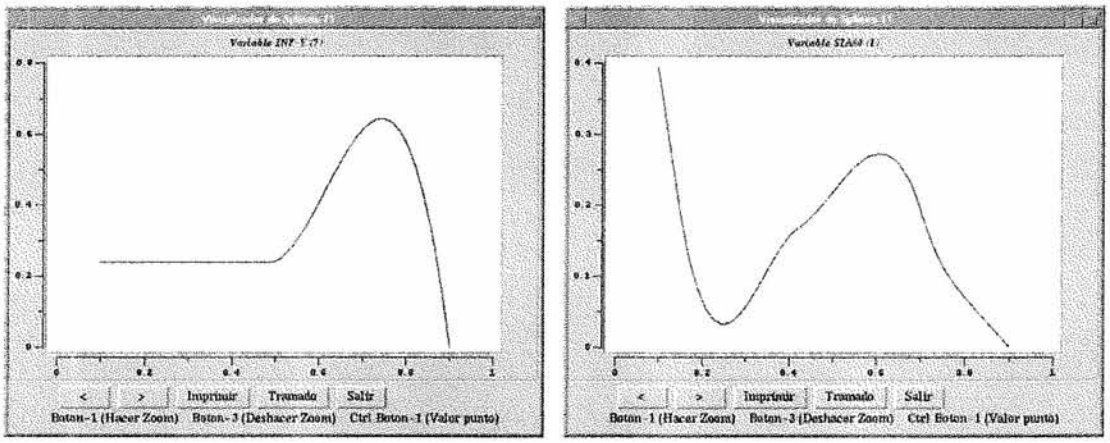

Figura 4. 11 – Ejemplo de salida gráfica del algoritmo de Splines Regresivos Multivariables Adaptativos

4.3.2.4 Aplicación de la Técnica de Proyección de Sammon

Se proyectará la distancia euclídea (proyección Sammon) entre las variables PC718T (Presión cuchilla norte), PC718D (Presión cuchilla sur), SIA80 (Velocidad de la línea), TE628R (Temperatura del pote), SMA80 (Corriente en la brida), SCA80 (Tensión en el centro), ANCHO (Ancho de la Bobina), INF-X (Distancia cuchilla en eje X), INF-Y (Distancia cuchilla en eje Y). Se distinguen trece grupos, tal y como se indica en la *Figura 4.12*

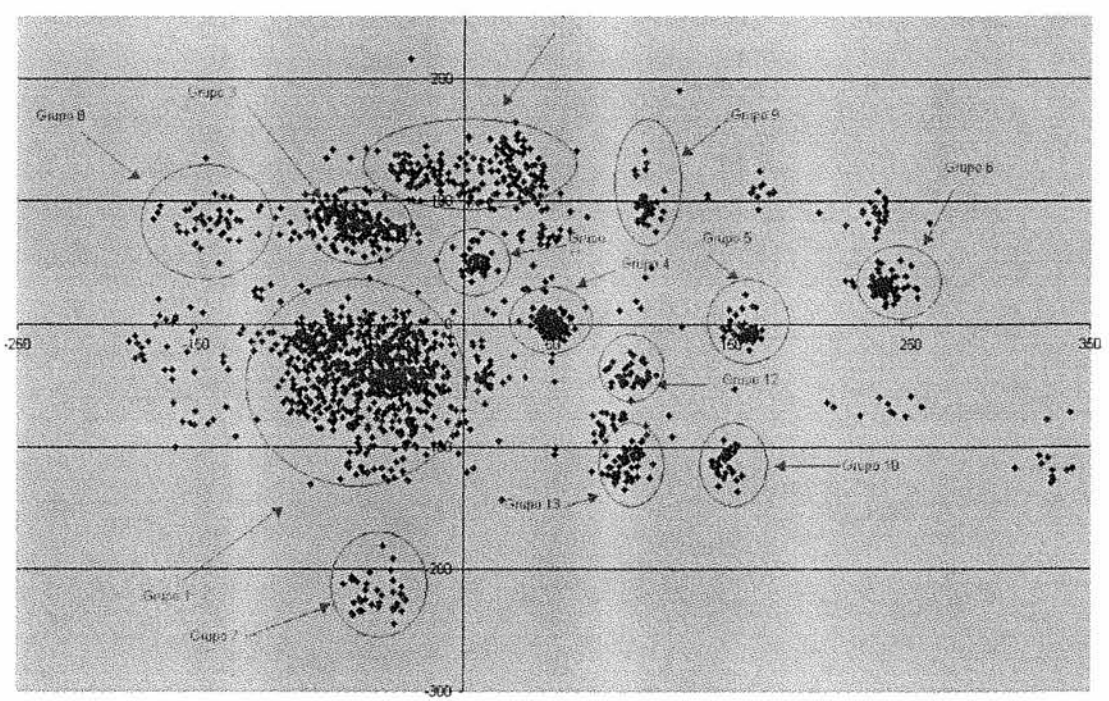

Figura 4. 12 - Distinción de los grupos de la proyección Sammon (distancia euclídea) de las variables de proceso a excepción de las referentes a recubrimientos reales.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

A continuación, se estudia cada uno de los grupos de forma independiente:

- ***Grupo 1***

Comprende principalmente recubrimientos de tipo EGC (145 gr/m^2 por cara), encontrándose también algunos recubrimientos de tipo EGA (52,5 gr/m^2 por cara) y EGB (105 gr/m^2 por cara). En el caso de recubrimiento EGA, los errores de recubrimiento son muy elevados (siempre por exceso), lo que aumenta mucho la media del error total para la zona. Los errores en el caso del recubrimiento EGA son siempre negativos, mientras que en los otros dos casos se encuentran errores tanto positivos como negativos.

Debe entenderse que errores negativos indican exceso de recubrimiento real, es decir el recubrimiento real está por encima del objetivo. En caso contrario la banda se consideraría defectuosa.

Los puntos situados en esta zona tienen todos en común un comportamiento similar en cuanto a las variables que definen el proceso, dicho comportamiento se detalla en la tabla mostrada a continuación.

	PC718T	*PC718D*	*SIA80*	*TE628R*	*SMA80*	*SCA80*	*ANCHO*	*INF-X*	*INF-Y*
Media	92,3636	87,27272	88,18155	480,67780	-0,975935	216,141	1274,0080	528,54	709,75
Desviación	1,96838	4,597176	15,55289	15,552891	0,2872777	22,8487	17,118590	25,956	8,6065

Tabla 4. 7 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC, EGB, EGA (grupo1).

Haciendo un estudio independiente para cada tipo de recubrimiento existente en el grupo obtenemos unos errores y comportamiento de las variables que son los siguientes.

Recubrimiento EGC (145 gr/m^2) Grupo 1 716 puntos

Tal y como se dijo anteriormente, este tipo de recubrimiento para este grupo presenta tanto errores positivos como negativos

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	-8,33155608	-22,5986509	-9,20990099
Desviación	12,8219742	12,0022857	7,29940073

Tabla 4. 8 - Errores de recubrimiento negativos EGC.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

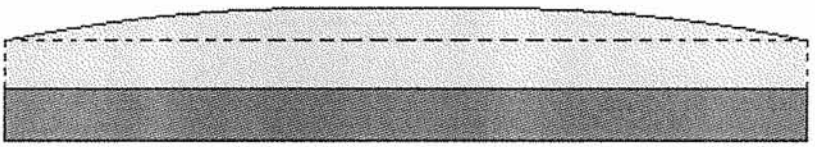

Figura 4. 13 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 1, recubrimiento EGC.

Para los errores positivos el comportamiento es el siguiente:

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	9,5467033	10,5772358	13,5687204
Desviación	8,71150818	14,2581631	14,7007861

Tabla 4. 9 - Errores de recubrimiento positivos EGC

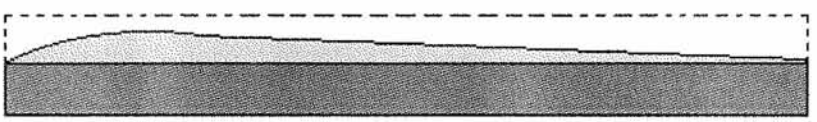

Figura 4. 14 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 1, recubrimiento EGC.

Este recubrimiento queda determinado por las variables:

	PC718T	*PC718D*	*SIA80*	*TE628R*	*SMA80*	*SCA80*	*ANCH*	*INF-X*	*INF-Y*
Media	92,43016	87,4106	88,5966	480,951	-0,98324	216,224	1273,530	527,26	709,621
Desviación	1,954556	4,56855	15,3368	26,7040	0,18995	22,8806	16,89988	25,481	8,76870

Tabla 4. 10 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC.

Se trata de la zona mayoritaria de trabajo, y los errores aun no siendo demasiado elevados si son en gran cantidad positivos, lo que resulta inaceptable por lo que debe delimitarse adecuadamente la zona de trabajo.

Recubrimiento EGB (105 gr/m^2) Grupo 1 8 puntos

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	-9,5	-11,7142857	-4,4
Desviación	9,19238816	3,86066858	4,27784993

Tabla 4. 11 - Errores de recubrimiento negativos EGB.

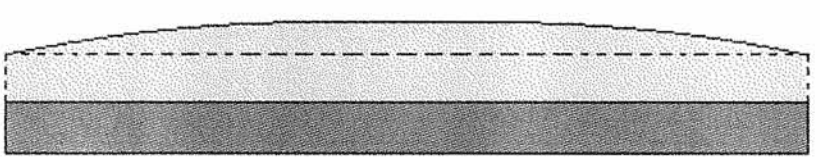

Figura 4. 15 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 1, recubrimiento EGB.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

De los ocho puntos que comprenden el grupo solo uno presenta errores por defecto de recubrimiento en el centro de la banda, siendo el numero de datos que presentan este mismo defecto en los extremos mayor.

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	9,3333333	23	5
Desviación	11,2368442	0	6,08

Tabla 4. 12 - Errores de recubrimiento positivos EGB.

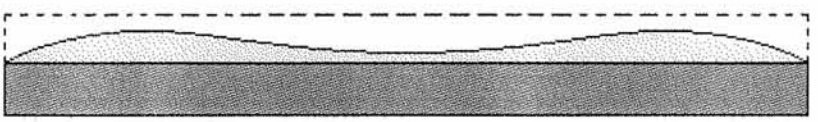

Figura 4. 16 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 1, recubrimiento EGC.

Este tipo de recubrimiento esta escasamente representado en este grupo, lo cual unido a que el numero de defectos de recubrimiento es relativamente elevado convierte a la zona en indeseable para conseguir acabados EGB.

	PC718T	*PC718D*	*SIA80*	*TE628R*	*SMA80*	*SCA80*	*ANCHO*	*INF-X*	*INF-Y*
Media	90	82	52,9375	441,75	-1	194,55	1281,5	556,625	712
Desviación	0	0	10,0295	0,46291	0	16,648723	9,258201	0,51754	0

Tabla 4. 13 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGB.

Recubrimiento EGA (52,5 gr/m^2) Grupo 1 24 puntos

Este grupo no presenta errores positivos, pero el elevado valor de los errores lo convierte en inaceptable para este tipo de recubrimiento.

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	-52,6666667	-62,4166667	-53,45833333
Desviación	28,5210322	31,484871	38,6663309

Tabla 4. 14 - Errores de recubrimiento negativos EGA

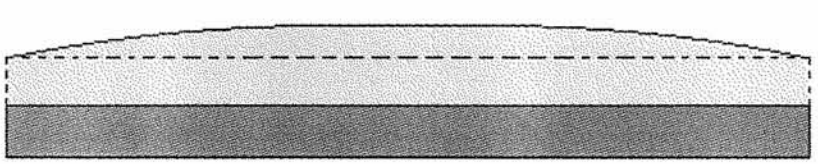

Figura 4. 17 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 1, recubrimiento EGA.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

	PC718T	PC718D	SIA80	TE628R	SMA80	SCA80	ANCHO	INF-X	INF-Y
Media	91,1666	84,9166	87,5458	485,5	-0,75	220,85	1285,75	554,37	712,8
Desviación	1,85722	4,64305	8,06335	32,3056	1,224744	19,7320	21,0709	21,070	0,916

Tabla 4. 15 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGA.

- ***Grupo 2***

Al igual que en el grupo 1, para el recubrimiento EGC y EGB existen tanto errores positivos como negativos, mientras que para el recubrimiento EGA solo existen errores negativos

En este grupo, al contrario que en el anterior abundan los recubrimientos tipo EGB siendo el comportamiento de las variables de proceso para el total de el grupo el siguiente:

	PC718T	PC718D	SIA80	TE628R	SMA80	SCA80	ANCH	INF-X	INF-Y
Media	93,9578	91,8947	64,4605	484,089	8,14736	357,157	1241,03	547,83	704,915
Desviación	0,409304	1,02326	12,3420	35,5514	3,39924	12,9755	23,9197	10,7655	8,0608

Tabla 4. 16 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC, EGB, EGA, (Grupo2).

Haciendo un estudio independiente para cada tipo de recubrimiento existente en el grupo se obtienen los siguientes errores y el siguiente comportamiento de las variables:

Recubrimiento EGC (145 gr/m^2) Grupo2 52 puntos

Este tipo de recubrimiento presenta tanto errores negativos como positivos siendo estos últimos relativamente escasos pero de muy elevado valor.

	Error Norte	Error Centro	Error Sur
Media	-8,02631579	-12,9	-4,27272727
Desviación	6,42834451	8,28591638	3,45753459

Tabla 4. 17 - Errores de recubrimiento negativo EGC

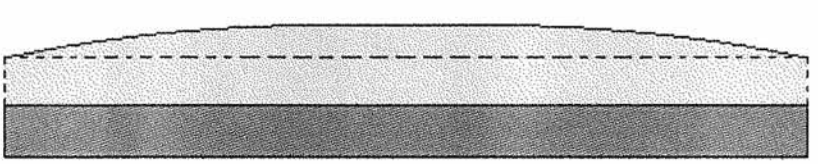

Figura 4. 18 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 2, recubrimiento EGC.

	Error Norte	Error Centro	Error Sur
Media	28,2857143	41,75	23,2631579
Desviación	9,32678996	4,28793233	15,3291375

Tabla 4. 18 - Errores de recubrimiento positivo EGC

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

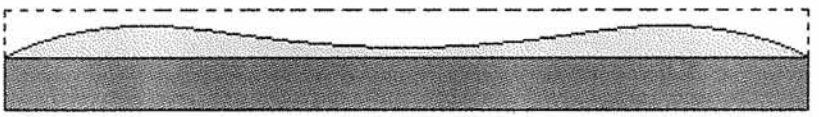

Figura 4. 19 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 2, recubrimiento EGC.

	PC718T	PC718D	SIA80	TE628R	SMA80	SCA80	ANCH	INF-X	INF-Y
Media	93,8461	91,6153	65,6807	461	7,88461	360,101	1254,09	535,98	704,8
Desviación	0,77673	1,94183	9,52252	32,3776	3,35865	9,12302	20,7990	8,5002	4,032

Tabla 4. 19 - . Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC

Recubrimiento EGB (105 gr/m^2) Grupo 2 110 puntos

Este tipo de recubrimiento también presenta tanto errores positivos como negativos, siendo las zonas mas problemáticas en cuanto a defecto de recubrimiento la norte y la centro.

	Error Norte	Error Centro	Error Sur
Media	-6,35897436	-3,5	-8,45631068
Desviación	3,89129685	6,59123998	4,16516059

Tabla 4. 20 - Errores de recubrimiento negativos EGB.

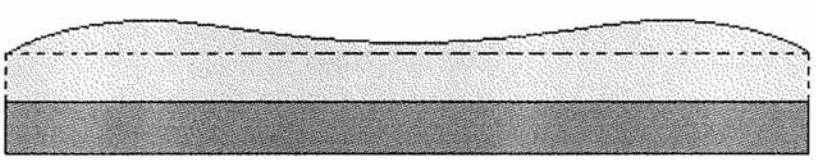

Figura 4. 20 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 2, recubrimiento EGB.

	Error Norte	Rec_obje – Rec_DIC	Error Sur
Media	5,28125	5,35365854	2,57142857
Desviación	2,39938668	4,62513784	1,39727626

Tabla 4. 21 - Errores de recubrimiento positivos EGB.

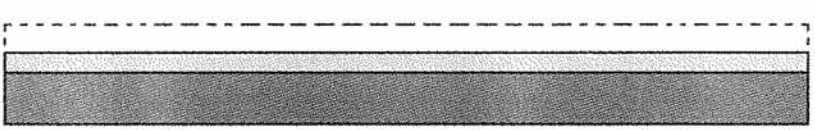

Figura 4. 21 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 2, recubrimiento EGB.

	PC718T	PC718D	SIA80	TE628R	SMA80	SCA80	ANCH	INF-X	INF-Y
Media	94	92	57,4945	495,718	8,77272	361,862	1228,5	548,90	701,9
Desviación	0	0	1,18923	41,1763	3,37464	8,19906	18,455	3,8254	7,749

Tabla 4. 22 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGB.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Recubrimiento EGA (52,5 gr/m^2) Grupo 2 28 puntos

Es destacable el hecho de no tener problemas de defecto de recubrimiento y que los errores por exceso sean relativamente pequeños, lo cual convierte a este grupo de trabajo en adecuado para este tipo de recubrimiento.

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	-15,75	-10,1428571	-16,2857143
Desviación	9,81542626	7,96852273	7,16140449

Tabla 4. 23 - Errores de recubrimiento EGA

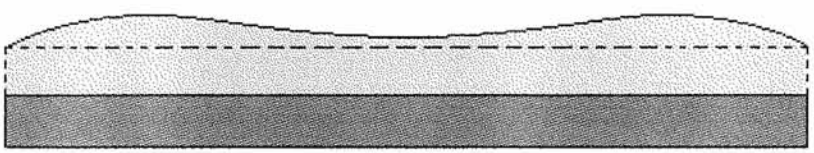

Figura 4. 22 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 2, recubrimiento EGA.

Las variables que caracterizan al grupo son:

	PC718T	*PC718D*	*SIA80*	*TE628R*	*SMA80*	*SCA80*	*ANCH*	*INF-X*	*INF-Y*
Media	94	92	89,5607	481,285	6,17857	333,207	1265,9	565,6	716,7
Desviación	0	0	5,94850	23,2265	2,80282	6,94256	7,7003	3,5832	0,975

Tabla 4. 24 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGA.

- ***Grupo 3***

En este grupo el único recubrimiento existente es el EGC Para este recubrimiento existen tanto errores positivos como negativos.

Se trata de una zona donde los errores son en su mayoría por exceso, siendo especialmente problemática la zona centro.

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	-12,0810811	-37,5086705	-10,1677852
Desviación	6,81086918	13,1439342	4,31747343

Tabla 4. 25 - Errores de recubrimiento negativos EGC.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

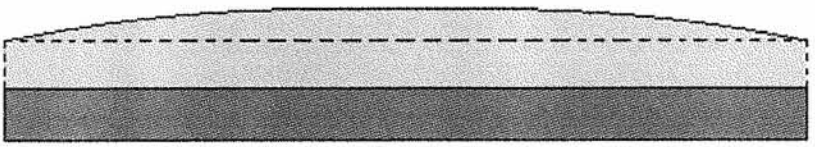

Figura 4. 23 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 3, recubrimiento EGC.

	Error Norte	Error Centro	Error Sur
Media	11,4193548	5,1666667	13,433333
Desviación	7,51786403	3,65604522	8,30738489

Tabla 4. 26 - Errores de recubrimiento positivos EGC.

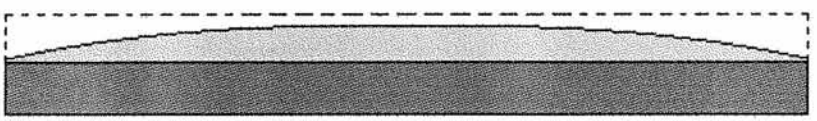

Figura 4. 24 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 3, recubrimiento EGC.

Las variables de proceso que hacen funcionar en esta zona son la siguientes:

	PC718T	PC718D	SIA80	TE628R	SMA80	SCA80	ANCH	INF-X	INF-Y
Media	90,04469	82,1117	98,5770	506,687	8,66480	324,277	1227,06	562,32	712,24
Desviación	0,421623	1,05405	4,53315	25,5143	4,10527	8,28548	13,5342	4,0540	1,9352

Tabla 4. 27 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC

- ***Gupo 4***

El tipo de recubrimiento dominante en este grupo es el EGA.

	PC718T	PC718D	SIA80	TE628R	SMA80	SCA80	ANCH	INF-X	INF-Y
Media	94	92	81,5150	469	3,27956	242,227	1217,07	543,89	713,81
Desviación	0	0	3,14735	11,7962	2,83750	6,35897	8,77030	2,5300	1,1604

Tabla 4. 28 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC, EGB, EGA (Grupo4).

Haciendo un estudio independiente para cada tipo de recubrimiento existente en el grupo obtenemos unos errores y comportamiento de las variables que son los siguientes.

Recubrimiento EGC (145 gr/m^2) Grupo 4 1 punto

De este tipo de recubrimiento solo de dispone de un único valor, donde los errores son negativos

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

	Error Norte	Error Centro	Error Sur
Dato EGC	-9	-10	-22

Tabla 4. 29 - Errores de recubrimiento EGC.

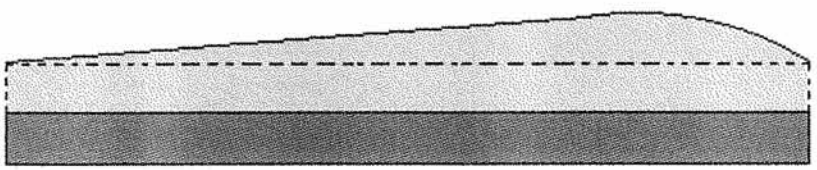

Figura 4. 25 - Perfil de recubrimiento para error negativo, grupo 4, recubrimiento EGC.

	PC718T	PC718D	SIA80	TE628R	SMA80	SCA80	ANCH	INF-X	INF-Y
Dato EGC	94	92	72,9	449	-1	267,6	1175	534	703

Tabla 4. 30 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC.

Recubrimiento EGB (105 gr/m^2) Grupo 4 3 puntos

Para este tipo de recubrimiento se dispone únicamente de 3 valores, siendo los errores siempre negativos y no demasiado grandes.

	Error Norte	Rec_obje – Rec_DIC	Error Sur
Media	-33,3333333	-15,66666667	-18
Desviación	4,61880215	2,30940108	1,73205081

Tabla 4. 31 - Errores de recubrimiento EGB.

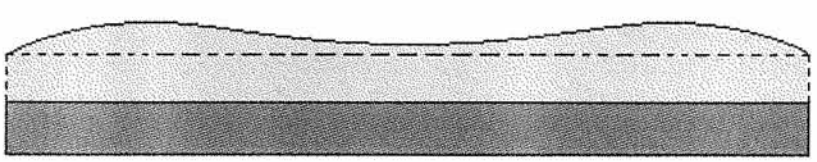

Figura 4. 26 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 4, recubrimiento EGB.

	PC718T	PC718D	SIA80	TE628R	SMA80	SCA80	ANCH	INF-X	INF-Y
Media	94	92	86,4333	451,333	-0,66667	250,3	1192	536,66	714
Desviación	0	0	0,45092	1,15470	0,57735	22,2816	8,6602	1,1547	0

Tabla 4. 32 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGB.

Recubrimiento EGA (52,5 gr/m^2) Grupo 4 89 puntos

Es el tipo de recubrimiento más extendido, donde los errores son siempre negativos

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

	Error Norte	Error Centro	Error Sur
Media	-48,4101124	-47,747191	-49,8595506
Desviación	17,0924229	13,6042133	13,2983656

Tabla 4. 33 - Errores de recubrimiento EGA.

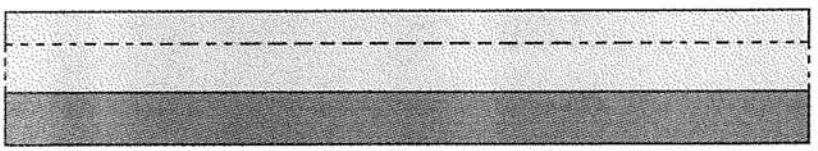

Figura 4. 27 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 4, recubrimiento EGA.

	PC718T	PC718D	SIA80	TE628R	SMA80	SCA80	ANCH	INF-X	INF-Y
Media	92	92	81,4460	469,820	3,46067	241,670	1218,3	544,24	713,93
Desviación	0	0	2,94595	11,3833	2,76362	4,59790	5,9498	1,9085	0,2521

Tabla 4. 34 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGA.

- ***Grupo 5***

En este grupo no existe recubrimiento EGA, y tan solo hay tres datos del recubrimiento EGB

Comportamiento de las variables de proceso para EGC, EGB

	PC718T	PC718D	SIA80	TE628R	SMA80	SCA80	ANCH	INF-X	INF-Y
Media	94	92	80,8577	451,133	-1	266,371	1083,1	535,36	703,95
Desviación	0	0	2,29093	1,40777	0	6,97891	5,7176	1,7471	3,6178

Tabla 4. 35 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC, EGB (Grupo5).

Haciendo un estudio independiente para cada tipo de recubrimiento existente en el grupo se obtienen unos errores y comportamiento de las variables que son los siguientes.

Recubrimiento EGC Grupo5 ***42 puntos***

Este tipo de recubrimiento presenta tanto errores positivos como negativos.

	Error Norte	Rec_obje – Rec_DIC	Error Sur
Media	-4,30434783	-8,30769231	-4,33333333
Desviación	4,91227389	5,72551644	4,55080779

Tabla 4. 36 - Errores de recubrimiento negativos EGC.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

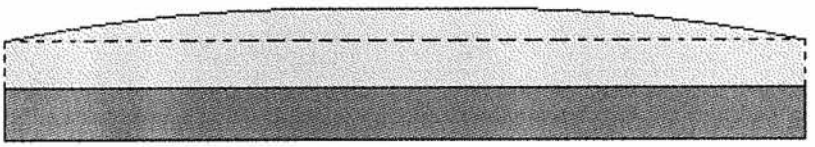

Figura 4. 28 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 5, recubrimiento EGC.

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	5,73684211	3,5625	6,97435897
Desviación	4,30557914	1,6307764	4,55080779

Tabla 4. 37 - Errores de recubrimiento positivos EGC.

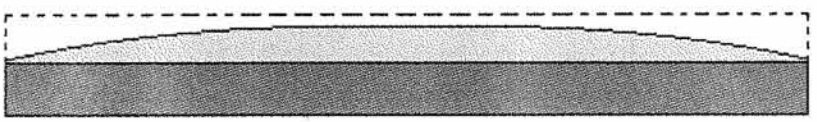

Figura 4. 29 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 5, recubrimiento EGC.

El numero de errores por defecto como por exceso son iguales y de semejante magnitud, lo que descarta esta zona como adecuada.

	PC718T	*PC718D*	*SIA80*	*TE628R*	*SMA80*	*SCA80*	*ANCH*	*INF-X*	*INF-Y*
Media	94	92	80,4476	451,261	-1	266,016	1082,97	535,26	703,23
Desviación	0	0	1,74387	1,34453	0	6,77973	5,8496	1,7538	2,4773

Tabla 4. 38 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC.

Recubrimiento EGB (105 gr/m^2) Grupo 5 3 puntos

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	-51	-42,6666667	-37,6666667
Desviación	8,66025404	1,15470054	0,57735027

Tabla 4. 39 - . Errores de recubrimiento negativos EGB.

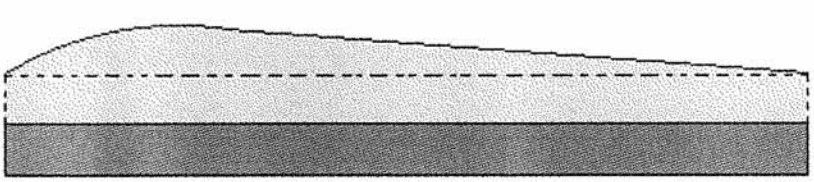

Figura 4. 30 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 5, recubrimiento EGB.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

	PC718T	PC718D	SIA80	TE628R	SMA80	SCA80	ANCH	INF-X	INF-Y
Media	94	92	86,6	449,333	-1	271,333	1085	536,66	714
Desviación	0	0	0,36055	1,15470	0	9,46907	3,4641	1,1547	0

Tabla 4. 40 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGB

- ***Grupo 6***

En este grupo el único recubrimiento existente es el de tipo EGC (65 puntos)

	Error Norte	Rec_obje – Rec_DIC	Error Sur
Media	-16,0204082	-20,1666667	-10,2068966
Desviación	15,0478262	21,3393221	10,0869181

Tabla 4. 41 - Errores de recubrimiento negativos EGC

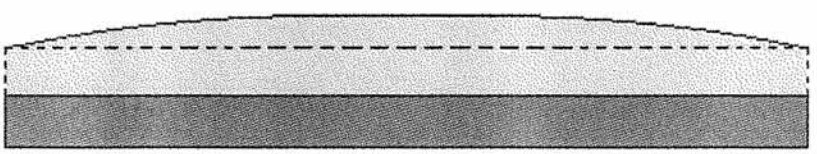

Figura 4. 31 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 6, recubrimiento EGC.

	Error Norte	Rec_obje – Rec_DIC	Error Sur
Media	4,8125	26,3728814	4,14285714
Desviación	4,460474561	7,16769165	2,79455252

Tabla 4. 42 - . Errores de recubrimiento positivos EGC

Figura 4. 32 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 6, recubrimiento EGC.

La cantidad de errores positivos en el centro de la banda es muy elevada asi como los errores cometidos en esa zona por lo que será recomendable no operar en esa zona.

Las variables de proceso son:

	PC718T	PC718D	SIA80	TE628R	SMA80	SCA80	ANCH	INF-X	INF-Y
Media	94	92	23,4123	449,938	-1	309,132	1015,26	535,36	717,07
Desviación	0	0	0,61758	1,56001	0	7,18588	7,59991	4,6722	1,6422

Tabla 4. 43 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

- ***Grupo 7***

El único tipo de recubrimiento existente en este grupo al igual que en el anterior es el EGC. Este recubrimiento solo presenta errores negativos (39 puntos)

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	-13	-32	-13
Desviación	0	0	0

Tabla 4. 44 - Errores de recubrimiento negativo EGC

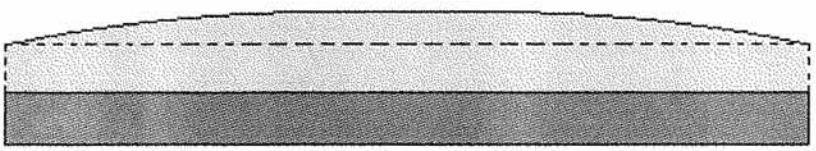

Figura 4. 33 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 7, recubrimiento EGC.

	PC718T	*PC718D*	*SIA80*	*TE628R*	*SMA80*	*SCA80*	*ANCH*	*INF-X*	*INF-Y*
Media	94	88	1,23076	513,512	-0,0769	56,6564	1226	540	694
Desviación	0	0	4,72769	19,0219	0,26995	15,2714	0	0	0

Tabla 4. 45 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC

El hecho de que los errores permanezcan constantes a lo largo del tiempo y que el recubrimiento objetivo sea siempre el mismo parece indicar un mal funcionamiento de la transferencia de datos con el sistema de medición del espesor del recubrimiento.

- ***Grupo 8***

Este grupo solo presenta un punto de recubrimiento EGA y el resto son EGC

	PC718T	*PC718D*	*SIA80*	*TE628R*	*SMA80*	*SCA80*	*ANCH*	*INF-X*	*INF-Y*
Media	90	82	100,219	478	5,29268	323,214	1363,7	564,60	712,4
Desviación	0	0	7,94119	24,399	4,84377	12,1974	16,494	1,0458	1,732

Tabla 4. 46 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC, EGA (Grupo8).

Haciendo un estudio independiente para cada tipo de recubrimiento existente en el grupo obtenemos unos errores y comportamiento de las variables que son los siguientes.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Recubrimiento EGC Grupo8 40 puntos

Para este recubrimiento, hay tanto errores positivos como negativos

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	-15,5	-19,5384	-6,7
Desviación	31,6814343	10,1640392	4,37289632

Tabla 4. 47 - Errores de recubrimiento negativo EGC

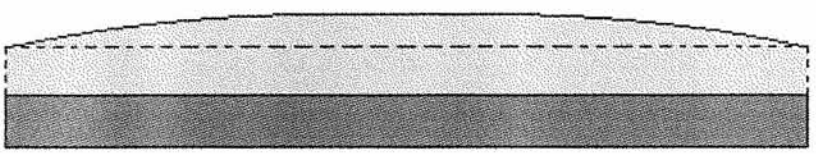

Figura 4. 34 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 8, recubrimiento EGC.

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	9,3	0	5,5
Desviación	6,06	0	6,425

Tabla 4. 48 - Errores de recubrimiento positivo EGC

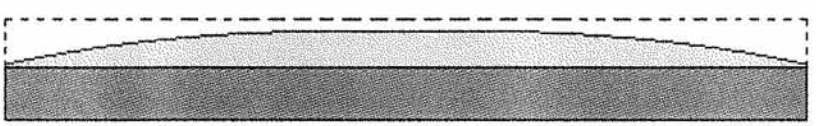

Figura 4. 35 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 8, recubrimiento EGC.

En estas bandas se encontró gran cantidad de errores de defecto de recubrimiento en las caras norte y sur, no así en la centro, lo que convierten a la zona de trabajo en no operativa.

	PC718T	*PC718D*	*SIA80*	*TE628R*	*SMA80*	*SCA80*	*ANCH*	*INF-X*	*INF-Y*
Media	90	82	101,272	476,65	5,375	324,162	1365,1	564,7	712,4
Desviación	0	0	4,24898	23,1079	4,87635	10,7150	14,442	0,8828	1,752

Tabla 4. 49 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC.

Recubrimiento EGA (52,5 gr/m^2) Grupo 8 1 punto

Solo existe un punto para este tipo de recubrimiento, los errores se presentan a continuación

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Dato	-25,5	-32,5	-34,5

Tabla 4. 50 - Errores de recubrimiento EGA.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

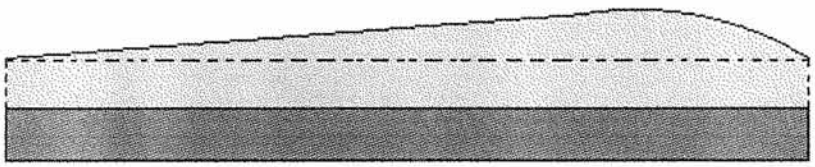

Figura 4. 36 - Perfil de recubrimiento para error negativ, grupo83, recubrimiento EGA.

	PC718T	PC718D	SIA80	TE628R	SMA80	SCA80	ANCH	INF-X	INF-Y
Dato	90	82	58,1	532	2	285,3	1312	561	713

Tabla 4. 51 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGA.

- ***Grupo 9***

Comprende únicamente recubrimientos de tipo EGA (52,5 gr/m^2 por cara), encontrándose errores en su totalidad negativos, es decir, dentro de los márgenes aceptables de funcionamiento.

Los puntos situados en esta zona tienen todos en común un comportamiento similar en cuanto a las variables que definen el proceso, dicho comportamiento se detalla en la tabla mostrada a continuación.

	PC718T	PC718D	SIA80	TE628R	SMA80	SCA80	ANCHO	INF-X	INF-Y
Media	93.88571	91.71428	61.66857	534.17142	6.7714285	322.965	1155.6571	559.97	716.057
Desviación	0.676123	1.690308	6.697223	7.4576676	3.5899018	15.1438	4.3854227	4.5405	0.63906

Tabla 4. 52 - . Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGA (grupo 9).

Los errores obtenidos para el tipo de recubrimiento incluido en este grupo y comportamiento de las variables son los siguientes.

Recubrimiento EGA (52,5 gr/m^2) Grupo 9 35 puntos

Tal y como se dijo anteriormente, este tipo de recubrimiento para este grupo presenta tan solo errores negativos

	Error Norte	Error Centro	Error Sur
Media	-18.1857143	-6.81428571	-18.8142857
Desviación	11.3027103	11.3287023	9.73402591

Tabla 4. 53 - . Errores de recubrimiento negativos EGA.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

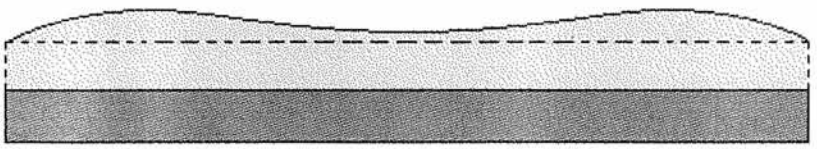

Figura 4. 37 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo9, recubrimiento EGA.

Se trata de una zona de trabajo de error muy pequeño, sin errores por defecto de recubrimiento, por lo que será la zona de trabajo a emplear para este tipo de recubrimiento.

- ***Grupo 10***

Comprende únicamente recubrimientos de tipo EGC (145 gr/m^2 por cara), encontrándose errores en su mayoría positivos (defectos de recubrimiento) lo que convierte a este grupo en no operativo sin precisar estudios ulteriores. (32 puntos)

Los puntos situados en esta zona tienen todos en común un comportamiento similar en cuanto a las variables que definen el proceso, dicho comportamiento se detalla en la tabla mostrada a continuación.

	PC718T	*PC718D*	*SIA80*	*TE628R*	*SMA80*	*SCA80*	*ANCHO*	*INF-X*	*INF-Y*
Media	94	92	98.08437	498.9375	-1	170.331	1075.3437	543.06	713.875
Desviación	0	0	0.807269	9.4217918	0	9.75438	4.1937693	1.5226	0.33601

Tabla 4. 54 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC (grupo10).

- ***Grupo 11***

Comprende únicamente recubrimientos de tipo EGC (145 gr/m^2 por cara), encontrándose errores tanto positivos como negativos. Se incluye dentro de este grupo dos únicos datos de recubrimiento EGA que se estudiaran por separado.

Los puntos situados en esta zona tienen todos en común un comportamiento similar en cuanto a las variables que definen el proceso, dicho comportamiento se detalla en la tabla mostrada a continuación.

	PC718T	*PC718D*	*SIA80*	*TE628R*	*SMA80*	*SCA80*	*ANCHO*	*INF-X*	*INF-Y*
Media	93.81818	87.72727	34.875	448.22727	-0.886363	297.943	1249.2045	527.36	694.363
Desviación	0.842828	1.264242	13.58436	13.564426	0.7537783	6.89129	9.0491668	9.5383	4.35137

Tabla 4. 55 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC (grupo11).

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Haciendo un estudio independiente para cada tipo de recubrimiento existente en el grupo obtenemos unos errores y comportamiento de las variables que son los siguientes.

Recubrimiento EGC (145 gr/m^2) Grupo11 44 puntos

Tal y como se dijo anteriormente, este tipo de recubrimiento para este grupo presenta tanto errores positivos como negativos

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	-13.125	-17.3636364	-7.8125
Desviación	8.50944853	9.04534034	8.38369193

Tabla 4. 56 - Errores de recubrimiento negativos EGC

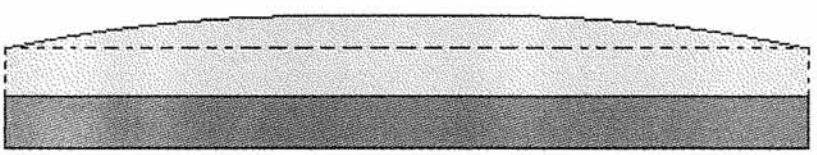

Figura 4. 38 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 11, recubrimiento EGC.

	Error Norte	*Rec_obje – Rec_DIC*	*Error Sur*
Media	9.16666667	0	9.18181818
Desviación	5.35323667	0	9.79610312

Tabla 4. 57 - Errores de recubrimiento positivos EGC.

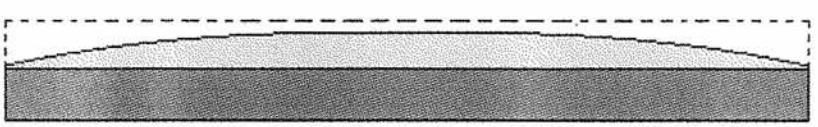

Figura 4. 39 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 11, recubrimiento EGC.

Se trata de una zona de trabajo de error muy pequeño, con pocos errores por defecto de recubrimiento, siendo estos últimos pequeños y prácticamente despreciables para las zona sur y norte y nulos en la zona centro.

Estas características la convierten en una zona de trabajo a tener en cuenta (debiendo optimizarse la zona norte).

Recubrimiento EGA (52,5 gr/m^2) Grupo11 (datos aislados) 2 puntos

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

	Error Norte	Rec_obje – Rec_DIC	Error Sur
Dato Ais 1	-14.5	-8.5	-15.5
Dato Ais 2	-14.5	-8.5	-15.5

Tabla 4. 58 - Errores de recubrimiento EGA.

El error es siempre negativo, es decir, recubrimiento en exceso, y de muy pequeño, aunque lo aislado de su aparición hace suponer que será difícil reproducir las condiciones necesarias para conseguir este recubrimiento y obtener resultados semejantes.

El comportamiento de las variables de proceso para este grupo es:

	PC718T	PC718D	SIA80	TE628R	SMA80	SCA80	ANCHO	INF-X	INF-Y
Dato Ais 1	94	92	94.6	482	6	285.3	1265	565	718
Dato Ais 2	94	92	91.4	479	7	301.5	1265	565	718

Tabla 4. 59 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGA.

Presenta valores de variables dispares a los del resto del grupo diferenciados principalmente en la posición espacial de las cuchillas.

- ***Grupo 12***

Comprende únicamente recubrimientos de tipo EGC (145 gr/m^2 por cara), encontrándose errores tanto positivos como negativos. Se incluye dentro de este grupo un único dato de recubrimiento EGA que se estudiara por separado.

Comprende únicamente recubrimientos de tipo EGC (145 gr/m^2 por cara), encontrándose errores tanto positivos como negativos. Se incluye dentro de este grupo un único dato de recubrimiento EGA que se estudiara por separado.

Los puntos situados en esta zona tienen todos en común un comportamiento similar en cuanto a las variables que definen el proceso, dicho comportamiento se detalla en la tabla mostrada a continuación.

	PC718T	PC718D	SIA80	TE628R	SMA80	SCA80	ANCHO	INF-X	INF-Y
Media	94	88	31.64210	452.07894	-1	223.636	1155.1842	527.94	677.315
Desviación	0	0	4.974944	3.2911148	0	5.96088	7.7733267	11.664	19.0945

Tabla 4. 60 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC (grupo12).

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Haciendo un estudio independiente para cada tipo de recubrimiento existente en el grupo obtenemos unos errores y comportamiento de las variables que son los siguientes.

Recubrimiento EGC (145 gr/m^2) Grupo 12 38 puntos

Tal y como se dijo anteriormente, este tipo de recubrimiento para este grupo presenta tanto errores positivos como negativos

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	-7.61290323	-19	-8.29411765
Desviación	5.33340054	17.9729527	5.14495755

Tabla 4. 61 - Errores de recubrimiento negativos EGC

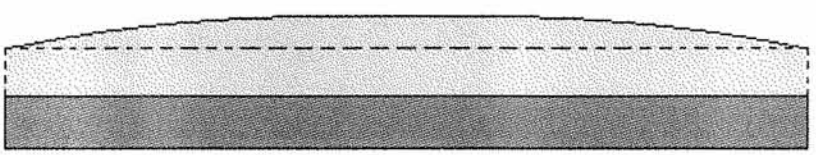

Figura 4. 40 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 12, recubrimiento EGC.

	Error Norte	*Rec_obje – Rec_DIC*	*Error Sur*
Media	6.57142857	0	12.5238095
Desviación	7.61264612	0	25.8700967

Tabla 4. 62 - Errores de recubrimiento positivos EGC.

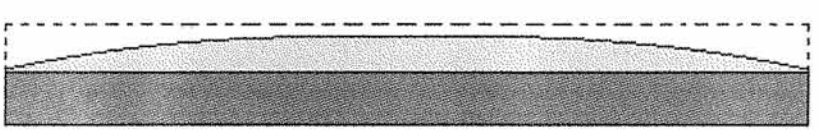

Figura 4. 41 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 12, recubrimiento EGC.

Se trata de una zona de trabajo con errores muy pequeños. Los errores por defecto son prácticamente despreciables para las zona norte, nulos en la zona centro y a tener en cuenta en la cara sur.

Estas características la convierten en una zona de trabajo a tener en cuenta (debiendo optimizarse la zona sur).

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Recubrimiento EGA (52,5 gr/m^2) Grupo 12 (dato aislado) ***1 punto***

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Dato Aislado	-37.5	-57.5	-59.5

Tabla 4. 63 - Errores de recubrimiento EGA

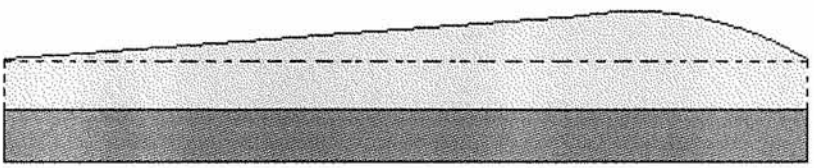

Figura 4. 42 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 12, recubrimiento EGA.

Aunque el error es siempre negativo, es decir, recubrimiento en exceso, resulta una zona no recomendable por lo elevado del error.

El comportamiento de las variables de proceso para este grupo es:

	PC718T	*PC718D*	*SIA80*	*TE628R*	*SMA80*	*SCA80*	*ANCHO*	*INF-X*	*INF-Y*
Dato Aislado	90	82	61.6	452	-1	206.1	1163	503	711

Tabla 4. 64 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGA.

Presenta valores de variable semejantes a los del resto del grupo diferenciados principalmente en la posición espacial de las cuchillas.

- ***Grupo 13***

Comprende principalmente recubrimientos de tipo EGC (145 gr/m^2 por cara), encontrándose también algunos recubrimientos de tipo EGA (52,5 gr/m^2 por cara). En el caso de recubrimiento EGA, los errores de recubrimiento son muy elevados (siempre por exceso o lo que es lo mismo negativos), lo que aumenta mucho la media del error total para la zona, mientras que en el caso de los recubrimientos EGC se encuentran errores tanto positivos como negativos.

Los puntos situados en esta zona tienen todos en común un comportamiento similar en cuanto a las variables que definen el proceso, dicho comportamiento se detalla en la tabla mostrada a continuación.

	PC718T	*PC718D*	*SIA80*	*TE628R*	*SMA80*	*SCA80*	*ANCHO*	*INF-X*	*INF-Y*
Media	92,36363	87,27272	88,18155	480,67780	-0,975935	216,141	1274,0080	528,54	709,75
Desviación	1,968386	4,597176	15,55289	15,552891	0,2872777	22,8487	17,118590	25,956	8,6065

Tabla 4. 65 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC, EGA (grupo13).

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Haciendo un estudio independiente para cada tipo de recubrimiento existente en el grupo obtenemos unos errores y comportamiento de las variables que son los siguientes.

Recubrimiento EGC (145 gr/m^2) Grupo 13 45 puntos

Tal y como se dijo anteriormente, este tipo de recubrimiento para este grupo presenta tanto errores positivos como negativos

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	-4.4	0	-2.4
Desviación	1.95505044	0	2.07364414

Tabla 4. 66 - Errores de recubrimiento negativos EGC

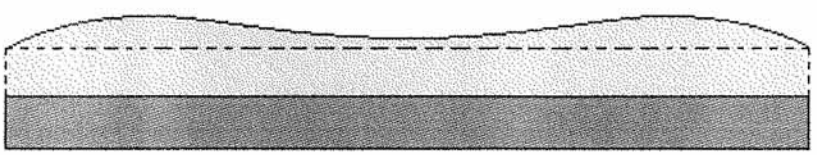

Figura 4. 43 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 13, recubrimiento EGC.

	Error Norte	*Rec_obje – Rec_DIC*	*Error Sur*
Media	5.71428571	6.84782609	4.90243902
Desviación	4.48901554	4.39174676	3.4554658

Tabla 4. 67 - Errores de recubrimiento positivos EGC

Figura 4. 44 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 13, recubrimiento EGC.

El hecho de que el numero de errores positivos sea elevado indica que se trata de una zona de trabajo (Grupo 13) indeseable para obtener recubrimientos EGC pues en la zona central de la banda siempre habrá defecto de recubrimiento.

Las variables de proceso que caracterizan la zona son:

	PC718T	*PC718D*	*SIA80*	*TE628R*	*SMA80*	*SCA80*	*ANCH*	*INF-X*	*INF-Y*
Media	94	92	97.9195	513.782	-1	173.723	1128.086	543.021	713.5
Desviación	0	0	0.80708	18.2706	0	8.36349	4.194314	1.02174	0.72264

Tabla 4. 68 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Recubrimiento EGA (52,5 gr/m²) Grupo13 10 puntos

	Error Norte	Error Centro	Error Sur
Media	-47	-52.2	-52.8
Desviación	11.3161635	8.70568141	7.3492252

Tabla 4. 69 - Errores de recubrimiento EGA

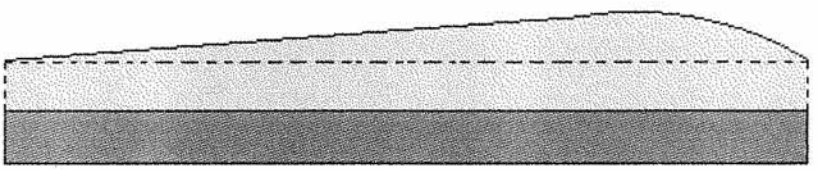

Figura 4. 45 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 13, recubrimiento EGA.

Aunque el error es siempre negativo, es decir, recubrimiento en exceso, resulta una zona no recomendable por lo elevado del error.

El comportamiento de las variables de proceso para este grupo es:

	PC718T	PC718D	SIA80	TE628R	SMA80	SCA80	ANCHO	INF-X	INF-Y
Media	90	82	60.28	488	-1	188.09	1167.8	499.5	710.6
Desviación	0	0	0.41041	20.6666	0	3.6891582	3.1198290	7.64852	0.516397

Tabla 4. 70 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGA.

4.3.2.5 Estudio Particular de los Diferentes Recubrimientos

Con el fin de determinar mejor los valores que toman las variables sometidas a estudio, poder caracterizarlas para cada tipo de recubrimiento y para evitar que recubrimientos defectuosos de un tipo interfieran en los resultados de otro se realizo un estudio por separado de cada uno de ellos.

Recubrimiento EGA 235 puntos

Proyectando de manera independiente las distancias euclídeas para las variables pertenecientes a lo puntos que integran el conjunto de recubrimientos EGA se obtiene la figura siguiente:

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

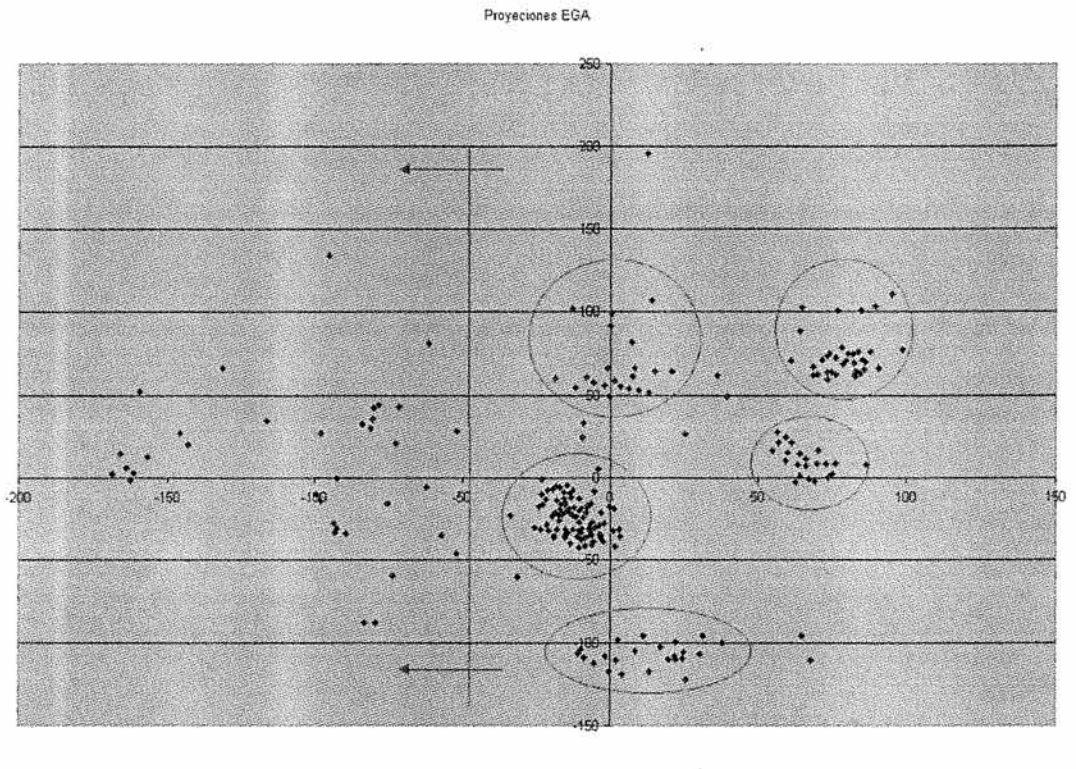

Figura 4. 46 – Proyección Sammon de los recubrimientos EGA.

Se procederá al estudio de cada grupo por separado.:

- ***Grupo 1 89 puntos***

Los puntos situados en esta zona tienen todos en común un comportamiento similar en cuanto a las variables que definen el proceso, dicho comportamiento se detalla en la tabla mostrada a continuación.

	PC718T	*PC718D*	*SIA80*	*TE628R*	*SMA80*	*SCA80*	*ANCHO*	*INF-X*	*INF-Y*
Media	94	92	81.4	470	3.5	242	1218	544	713.9
Desviación	0	0	2.95	11.4	2.8	4.6	5.95	1.9	0.252

Tabla 4. 71 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGA (grupo1).

Este tipo de recubrimiento para este grupo presenta únicamente errores negativos

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

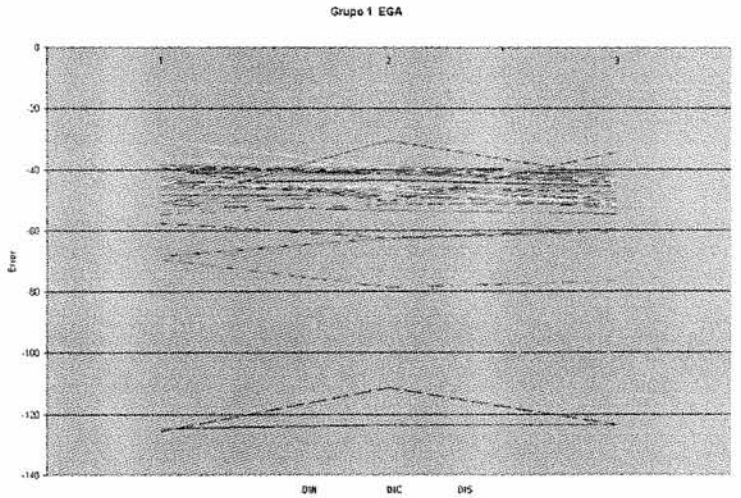

Figura 4. 47 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGA del grupo 1.

Se observa un comportamiento más o menos uniforme en el espesor de recubrimiento a lo ancho de la banda (que es principalmente debido a lo alejado de la cuchilla a la banda en la dirección horizontal), pero se consigue a costa de cometer un error en exceso de recubrimiento inaceptable por lo elevado.

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	-48.4101124	-47.747191	-49.8595506
Desviación	17.0924229	13.6042113	13.2983656

Tabla 4. 72 - Errores de recubrimiento negativos EGA

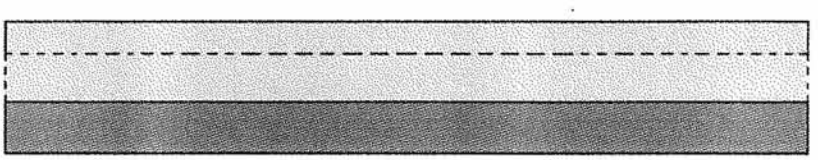

Figura 4. 48 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 1, recubrimiento EGA.

- ***Grupo 2 35 puntos***

Los puntos situados en esta zona tienen todos en común un comportamiento similar en cuanto a las variables que definen el proceso, dicho comportamiento se detalla en la tabla mostrada a continuación.

	PC718T	*PC718D*	*SIA80*	*TE628R*	*SMA80*	*SCA80*	*ANCHO*	*INF-X*	*INF-Y*
Media	93.88571	91.71428	61.66857	534.17142	6.7714285	322.965	1155.6571	559.97	716.057
Desviación	0.676123	1.690308	6.697223	7.4576676	3.5899018	15.1438	4.3854227	4.5405	0.63906

Tabla 4. 73 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGA (grupo2).

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Este tipo de recubrimiento para este grupo presenta únicamente errores negativos

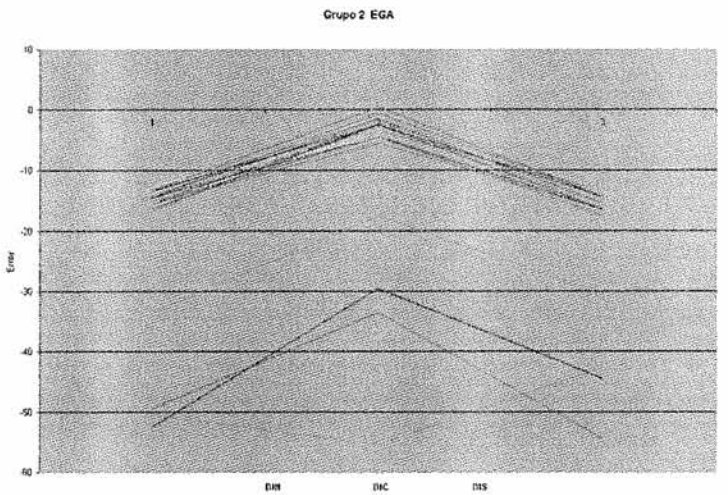

Figura 4. 49 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGA del grupo 2.

Los recubrimientos que se desvían de lo normal en cuanto a exceso de recubrimiento tienen en común un valor muy elevado en el sensor de corriente en la brida lo que confirma la elevada importancia que tiene dicha variable en el espesor de recubrimiento final (como ya se demostró en estudios previos).

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	-18.1857143	-6.81428571	-18.8142857
Desviación	11.3027103	11.3287023	9.73402591

Tabla 4. 74 - Errores de recubrimiento negativos EGA

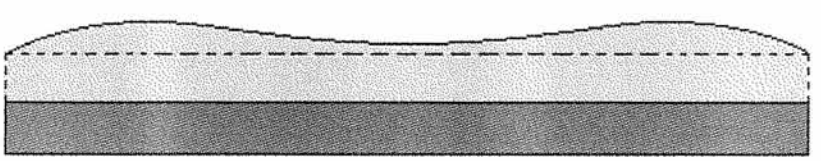

Figura 4. 50 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 2, recubrimiento EGA.

- ***Grupo 3 22 puntos***

Los puntos situados en esta zona tienen todos en común un comportamiento similar en cuanto a las variables que definen el proceso, dicho comportamiento se detalla en la tabla mostrada a continuación.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

	PC718T	PC718D	SIA80	TE628R	SMA80	SCA80	ANCHO	INF-X	INF-Y
Media	94	92	90.72727	470.40909	6.2272727	332.35	1266	566.09	716.909
Desviación	0	0	0.507263	7.9979705	2.5058373	5.37540	7.5023805	1.0192	1.01929

Tabla 4. 75 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGA (grupo3).

Este tipo de recubrimiento para este grupo presenta únicamente errores negativos

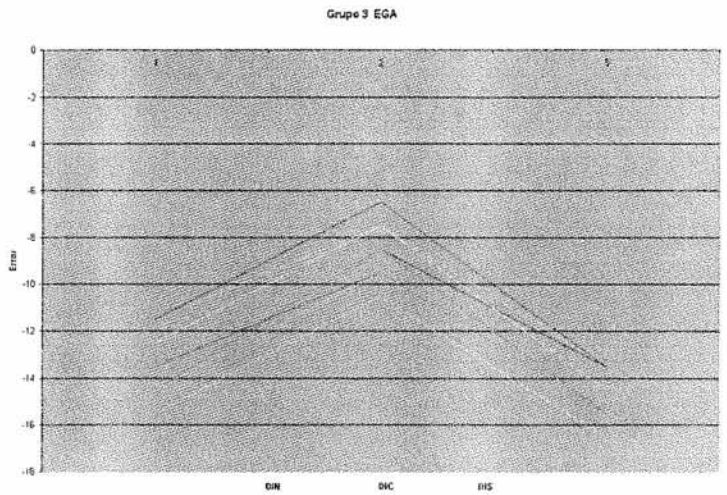

Figura 4. 51 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGA del grupo 3.

La elevada velocidad de la banda combinada con la proximidad de la cuchilla a la misma permite obtener una disminución del error considerable, pero tiene como contrapartida una perdida de uniformidad superficial en el recubrimiento a lo ancho de la banda.

	Error Norte	Error Centro	Error Sur
Media	-13.8636364	-8.45454545	-14.7272727
Desviación	1.25529183	0.99891716	0.92230654

Tabla 4. 76 - Errores de recubrimiento negativos EGA

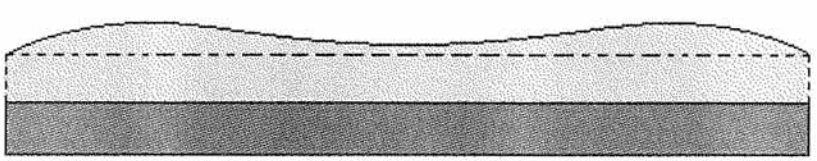

Figura 4. 52 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 3, recubrimiento EGA.

Grupo 4 23 puntos

Los puntos situados en esta zona tienen todos en común un comportamiento similar en cuanto a las variables que definen el proceso, dicho comportamiento se detalla en la tabla mostrada a continuación.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

	PC718T	PC718D	SIA80	TE628R	SMA80	SCA80	ANCHO	INF-X	INF-Y
Media	91.39130	85.47826	68.19565	523.73913	3.4782608	309.643	1240.2608	562.13	714.043
Desviación	1.947939	4.869847	15.35413	10.419463	3.0580678	19.8418	26.613765	4.1154	1.46095

Tabla 4. 77 - Comportamiento estadístico de las variablesque influyen en el proceso de recubrimiento EGA (grupo4).

Este tipo de recubrimiento para este grupo presenta únicamente errores negativos

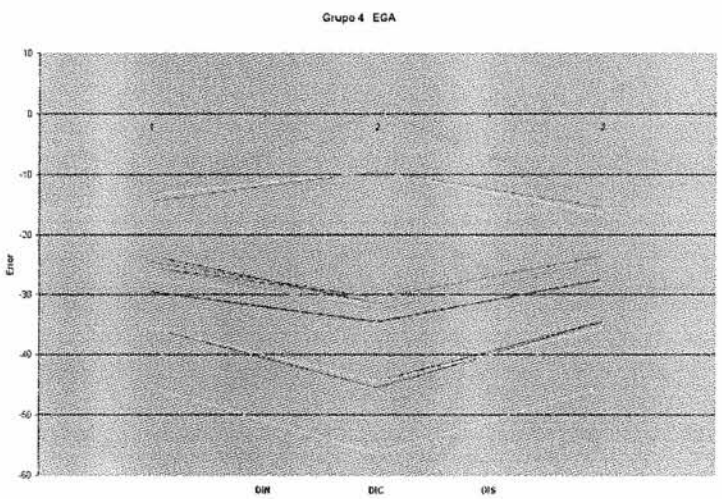

Figura 4. 53 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGA del grupo 4.

Los valores aislados que presenta un perfil con defecto de recubrimiento en el centro de la banda en comparación con los extremos están ocasionados por una situación de las cuchillas mas próxima a la banda que el resto.

	Error Norte	Error Centro	Error Sur
Media	-26.5	-28.7173913	-25.673913
Desviación	12.4681412	15.9172763	10.0211239

Tabla 4. 78 - Errores de recubrimiento negativos EGA

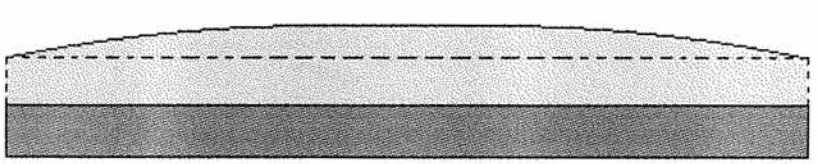

Figura 4. 54 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 4, recubrimiento EGA.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Grupo 5 23 puntos

Los puntos situados en esta zona tienen todos en común un comportamiento similar en cuanto a las variables que definen el proceso, dicho comportamiento se detalla en la tabla mostrada a continuación.

	PC718T	*PC718D*	*SIA80*	*TE628R*	*SMA80*	*SCA80*	*ANCHO*	*INF-X*	*INF-Y*
Media	90	82	61.45217	476.43478	-1	191.508	1167.3913	500.78	710.913
Desviación	0	0	5.806256	21.706358	0	5.90530	4.8965584	6.2592	0.73317

Tabla 4. 79 - Comportamiento estadístico de las variablesque influyen en el proceso de recubrimiento EGA (grupo5).

Este tipo de recubrimiento para este grupo presenta únicamente errores negativos

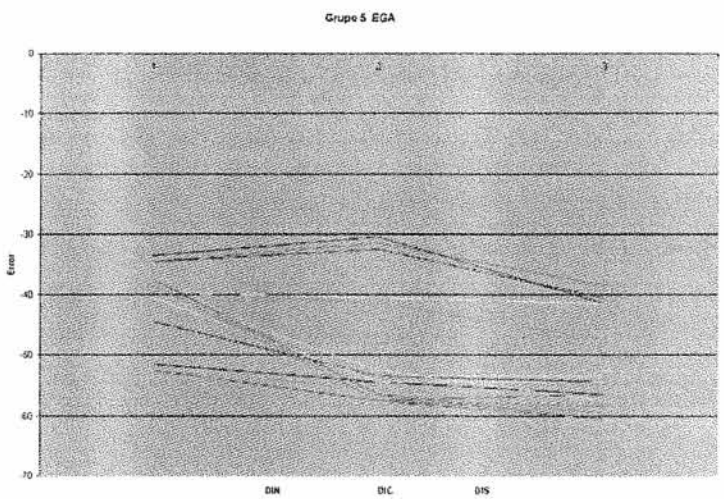

Figura 4. 55 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGA del grupo 5.

Nuevamente los datos aislados que presentan un comportamiento "anómalo" dentro del grupo se obtienen con posiciones de cuchilla mas cercanas a la banda.

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	-41.7173913	-51.2826087	-53.8043478
Desviación	8.77473917	9.05516689	7.19491476

Tabla 4. 80 - Errores de recubrimiento negativos EGA

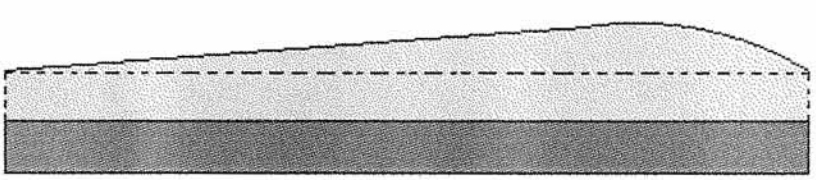

Figura 4. 56 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 5, recubrimiento EGA.

Grupo 6 36 puntos

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Los puntos situados en esta zona tienen todos en común un comportamiento similar en cuanto a las variables que definen el proceso, dicho comportamiento se detalla en la tabla mostrada a continuación.

	PC718T	*PC718D*	*SIA80*	*TE628R*	*SMA80*	*SCA80*	*ANCHO*	*INF-X*	*INF-Y*
Media	90.88888	84.22222	87.49722	484.05555	-0.638888	225.730	1313.1388	558.25	712.888
Desviación	1.686548	4.216370	8.457101	33.398840	1.7263136	26.6459	43.508391	18.254	0.94951

Tabla 4. 81 - Comportamiento estadistico de las variablesque influyen en el proceso de recubrimiento EGA (grupo5).

Este tipo de recubrimiento para este grupo presenta únicamente errores negativos

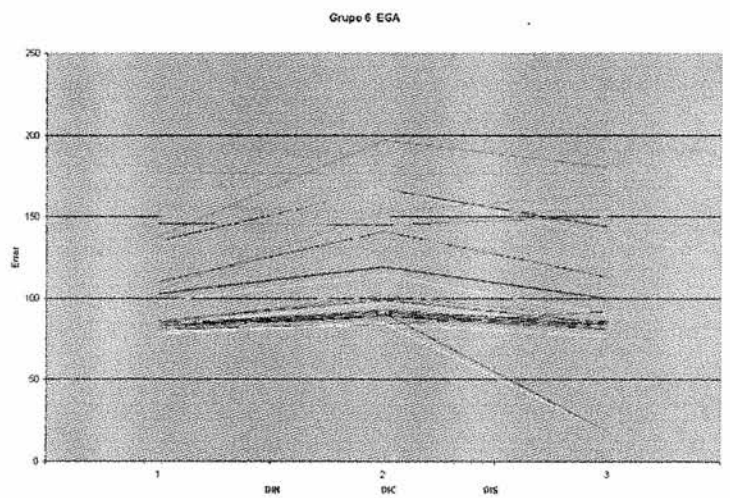

Figura 4. 57 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGA del grupo 6.

Los datos que presentan un exceso de recubrimiento, se dan para emplazamientos de la cuchilla tanto mas alejados cuanto mayor es el exceso lo que determina una distancia unos rangos factibles máximos de variación de las cuchillas.

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	-51.6111111	-63.7777778	-51.3611111
Desviación	30.3275243	34.9224538	39.662975

Tabla 4. 82 - Errores de recubrimiento negativos EGA

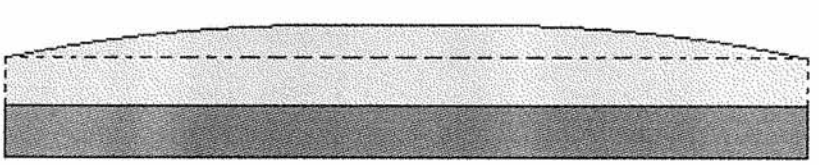

Figura 4. 58 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 6, recubrimiento EGA.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Recubrimiento EGB 161 puntos

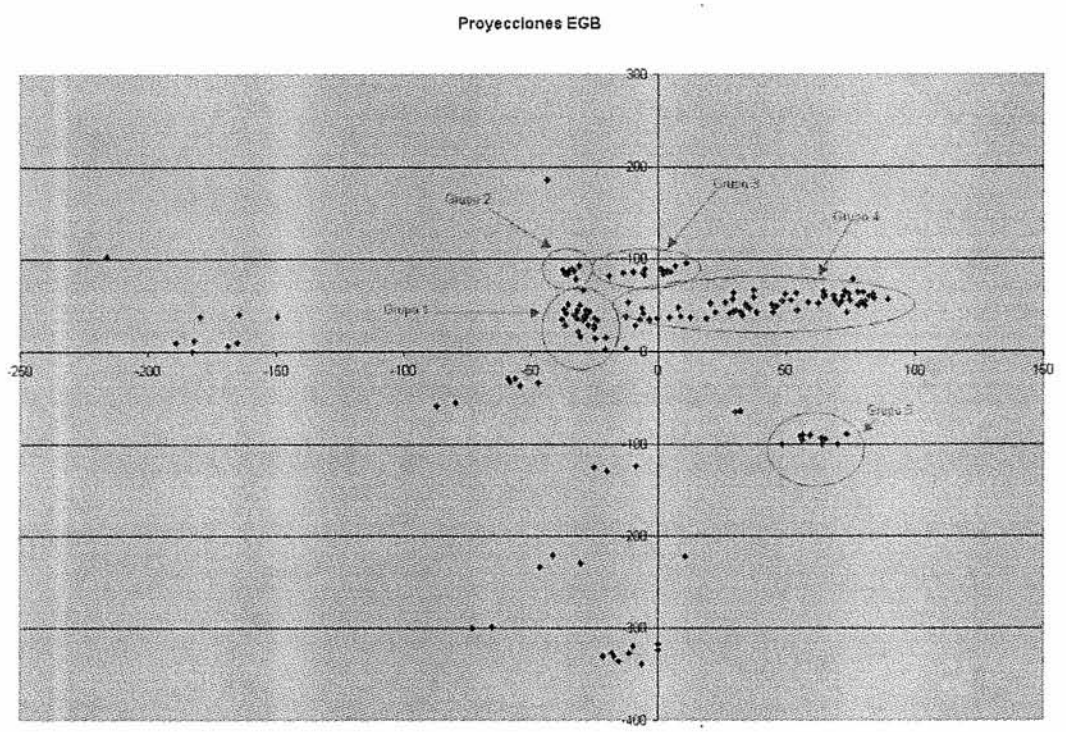

Figura 4. 59 – Proyección Sammon de los recubrimientos EGB.

A continuación, se estudia cada uno de los grupos de forma independiente:

- ***Grupo 1***

Los puntos situados en esta zona, un total de 27, tienen todos en común un comportamiento similar en cuanto a las variables que definen el proceso, dicho comportamiento se detalla en la tabla mostrada a continuación.

	PC718T	*PC718D*	*SIA80*	*TE628R*	*SMA80*	*SCA80*	*ANCHO*	*INF-X*	*INF-Y*
Media	94	92	57,08518	446,40740	7,6666667	361,707	1220,7407	550,03	701
Desviación	0	0	1,338111	15,552891	3,1132471	10,7096	8,7863206	6,4008	6,01280

Tabla 4. 83 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGB

Este grupo presenta tanto errores positivos como negativos

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

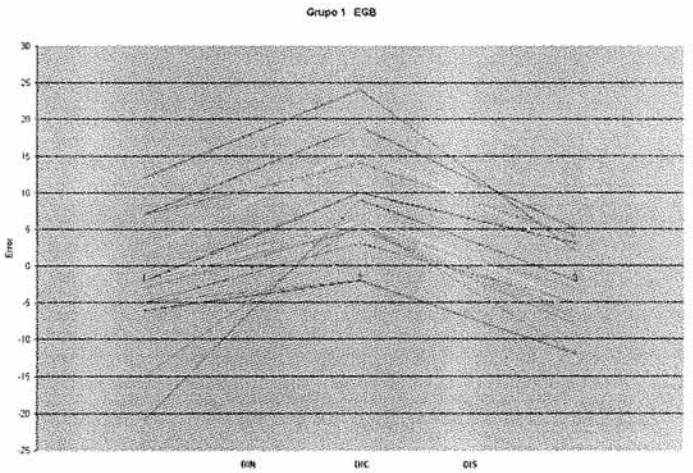

Figura 4. 60 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGB del grupo 1.

Los valores de exceso de recubrimiento son ocasionados por una combinación de dos variables, una posición alejada de la cuchilla respecto de la banda y una tensión pequeña en la misma lo que además del defecto de exceso produce la falta de uniformidad superficial.

La mayor parte de los datos presentan comportamientos indeseables tanto en defecto de recubrimiento como en falta de uniformidad.

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	-5,5	-2	-7,47368421
Desviación	5,41512044	0	3,13348264

Tabla 4. 84 - Errores de recubrimiento negativos EGB.

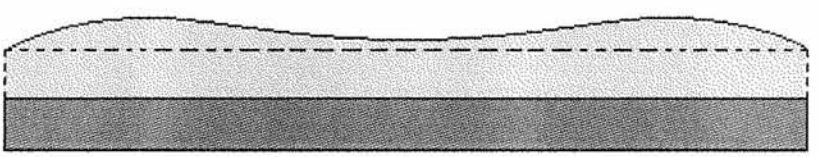

Figura 4. 61 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 1, recubrimiento EGB.

Para los errores positivos el comportamiento es el siguiente:

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	5	9,04	2,625
Desviación	3,968626967	5,84864657	1,30247018

Tabla 4. 85 - Errores de recubrimiento positivos EGB

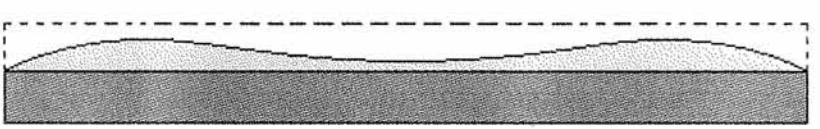

Figura 4. 62 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 1, recubrimiento EGB.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

El número de errores negativos y positivos en el caso DIN es de 18 y 9 respectivamente; en el caso DIC de 2 y 25 y en el caso DIS de 19 y 8.

- ***Grupo 2***

El número de elementos de este grupo es de 8 y al igual que en el grupo 1, existen tanto errores positivos como negativos. El comportamiento de las variables de proceso para el total de el grupo es el siguiente:

	PC718T	*PC718D*	*SIA80*	*TE628R*	*SMA80*	*SCA80*	*ANCH*	*INF-X*	*INF-Y*
Media	94	92	59,2625	454,875	7,375	361,412	1268,37	553	716
Desviación	0	0	0,19955	1,35620	1,06066	5,53467	3,42000	4,14039	0

Tabla 4. 86 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC, EGB, EGA, (Grupo2).

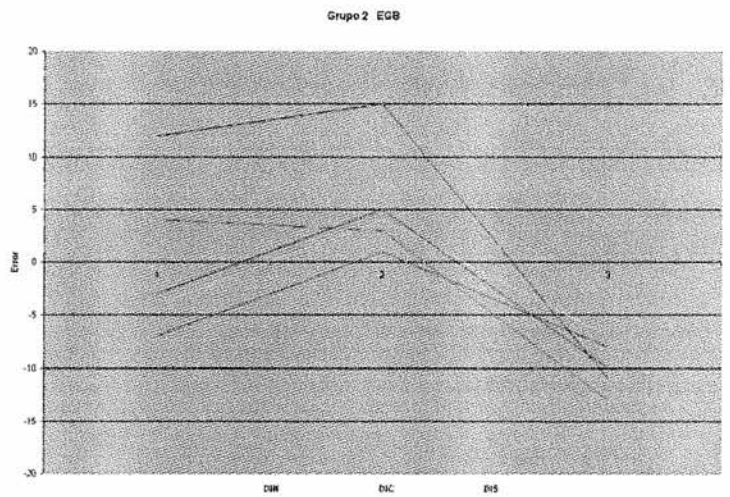

Figura 4. 63 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGB del grupo 2.

Una vez más el defecto de recubrimiento es ocasionado por una excesiva aproximación de la cuchilla a la banda y la falta de uniformidad es debida a la baja tensión de la misma.

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	-4,4	-1	-10,375
Desviación	1,51657509	0	2,82526863

Tabla 4. 87 - Errores de recubrimiento negativo EGB

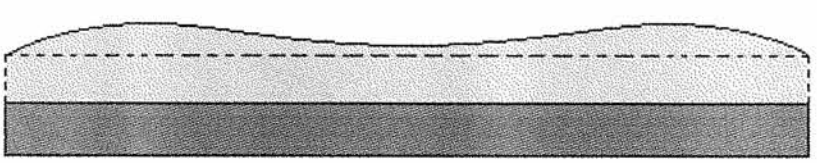

Figura 4. 64 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 2, recubrimiento EGB.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

	Error Norte	Error Centro	Error Sur
Media	6,6666667	5	0
Desviación	4,61880215	4,58257569	0

Tabla 4. 88 - Errores de recubrimiento positivo EGB

Figura 4. 65 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 2, recubrimiento EGB.

El número de errores negativos y positivos en el caso DIN es de 5 y 3 respectivamente; en el caso DIC es de 1 y 7 y en el caso DIS no existen errores positivos.

- ***Grupo 3***

Este grupo está formado por un total de 13 puntos y el comportamiento de las variables de proceso para el total de el grupo es el siguiente:

	PC718T	PC718D	SIA80	TE628R	SMA80	SCA80	ANCH	INF-X	INF-Y
Media	94	92	59,2538	486,307	11,6153	361,415	1262,07	547,538	716,461
Desviación	0	0	0,16641	8,84481	2,90225	7,86943	1,97743	0,51887	0,51887

Tabla 4. 89 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGB

El comportamiento de los errores es el siguiente:

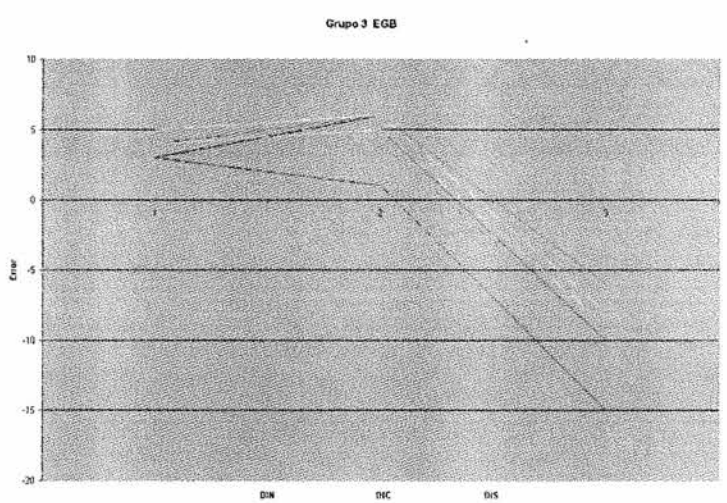

Figura 4. 66 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGB del grupo 3.

A pesar de que todos los datos se obtienen para posicionamientos semejantes de las cuchillas las zonas con mayores defectos son aquellas en que la banda esta menos tensa.

En el caso de sectores Norte y Centro los errores son siempre positivos, no si en el Sur que son siempre negativos

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

	Error Norte	Error Centro	Error Sur
Media			-9,07692309
Desviación			2,17797836

Tabla 4. 90 - Errores de recubrimiento negativos EGB.

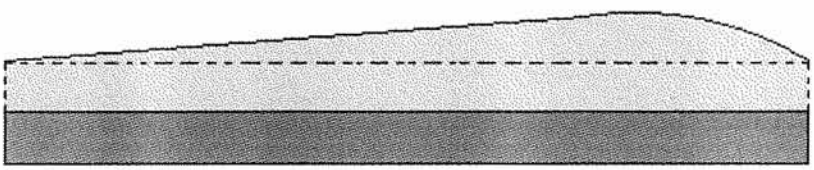

Figura 4. 67 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 3, recubrimiento EGB.

	Error Norte	Error Centro	Error Sur
Media	4,30769231	4,61538462	
Desviación	0,75106762	1,32529629	

Tabla 4. 91 - Errores de recubrimiento positivos EGB.

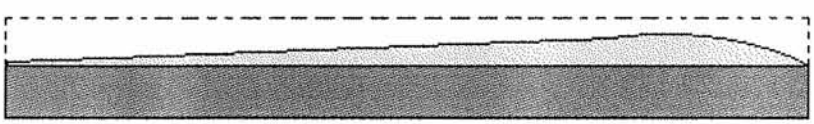

Figura 4. 68 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 3, recubrimiento EGB.

- ***Grupo 4***

El número de puntos es de 63

	PC718T	PC718D	SIA80	TE628R	SMA80	SCA80	ANCH	INF-X	INF-Y
Media	94	92	57,0698	523,174	8,85714	361,763	1219,33	548,22	697,46
Desviación	0	0	0,65368	30,7699	3,42597	7,80490	5,41503	1,7454	0,5024

Tabla 4. 92 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGB.

Hay tanto errores positivos como negativos

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

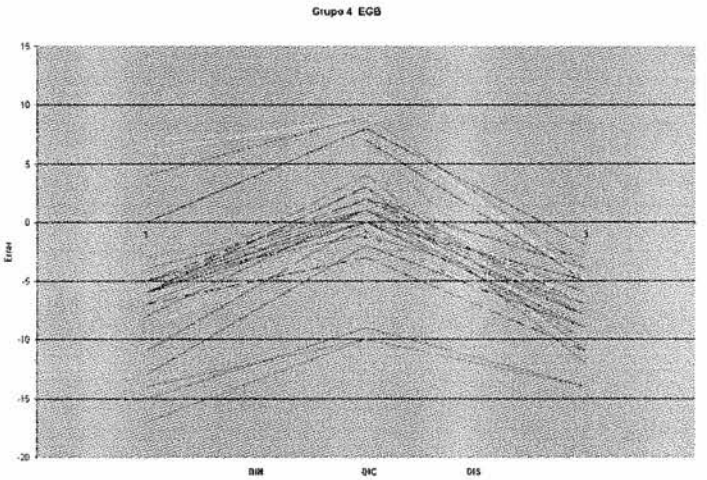

Figura 4. 69 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGB del grupo 4.

Se observa en la *Figura 4.88* que existen tres subgrupos de bandas en las que el defecto de recubrimiento aumenta a medida que disminuye la tensión en la banda.

En el caso DIS los errores son siempre negativos. En el caso DIN hay 53 negativos y 10 positivos, y en el caso DIC hay 16 negativos y 47 positivos

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	-7,11320755	-5,8125	-8,38095238
Desviación	3,08008727	8,0267781	4,79727265

Tabla 4. 93 - Errores de recubrimiento negativos EGB.

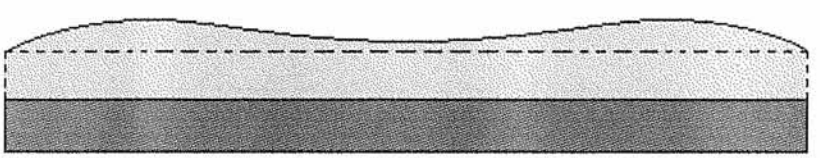

Figura 4. 70 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 4, recubrimiento EGB.

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	4,8	2,72340426	
Desviación	2,69979423	2,84147947	

Tabla 4. 94 - Errores de recubrimiento positivos EGB.

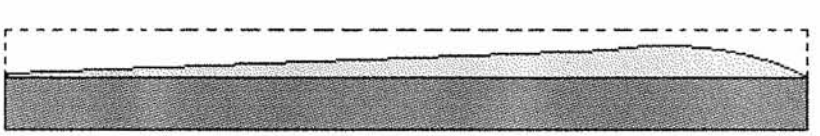

Figura 4. 71 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 4, recubrimiento EGB.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

- ***Grupo 5***

El número de puntos de este grupo es de 11. El comportamiento de las variables de proceso es el siguiente:

	PC718T	PC718D	SIA80	TE628R	SMA80	SCA80	ANCH	INF-X	INF-Y
Media	94	92	83,6727	449,727	10,8181	366,254	1079,2	538,18	712,45
Desviación	0	0	7,39054	4,12530	2,04049	6,97701	12,434	4,0451	5,1256

Tabla 4. 95 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGB

Tanto para el caso DIC, como para el DIS y el DIN los errores son siempre negativos y elevados.

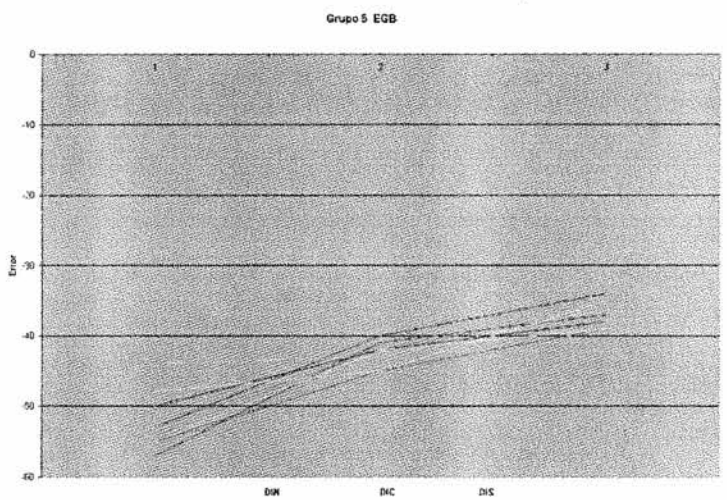

Figura 4. 72 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGB del grupo 5.

La falta de uniformidad del recubrimiento superficial se debe a la disposición de las cuchillas una vez más.

	Error Norte	Error Centro	Error Sur
Media	-50,7272727	-43,3636364	-39,3636364
Desviación	4,77683806	3,23334895	9,63610634

Tabla 4. 96 - Errores de recubrimiento negativos EGB

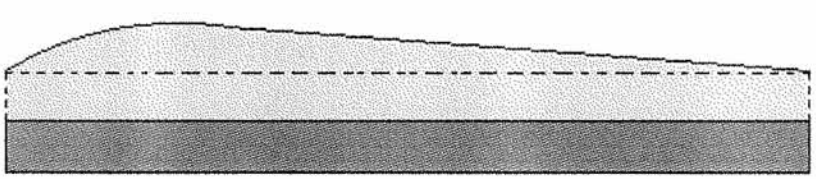

Figura 4. 73 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 5, recubrimiento EGB.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Recubrimiento EGC 1362 puntos

Se trata de el tipo de recubrimiento dominante en la muestra sometida a estudio. Dado que el proceso puede determinarse según el comportamiento de un numero relativamente pequeño de variables, toda la información obtenida para este tipo de recubrimiento podrá hacerse extensible a recubrimientos con mayor cantidad de Zn por m^2, encontrándose para el caso de cantidades de recubrimiento menores aparecen ligeros cambios que obligan a un estudio detallado, es el caso de los recubrimientos EGA y EGB

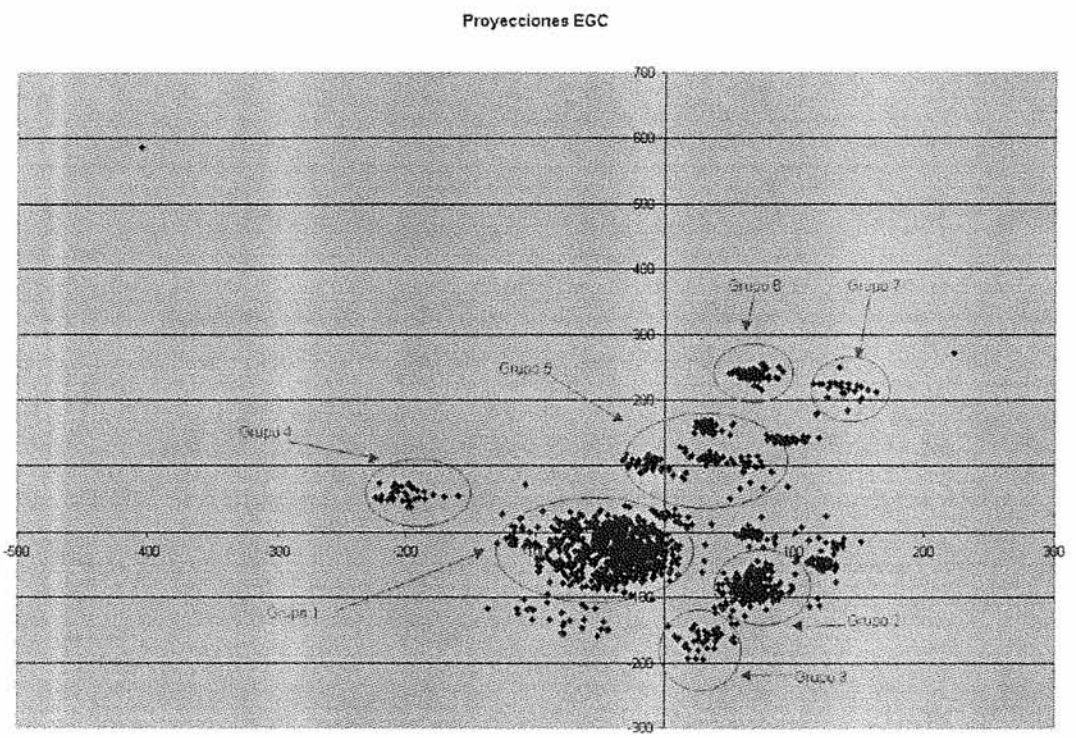

Figura 4. 74 – Proyección Sammon para los recubrimientos EGC.

A continuación, se estudia cada uno de los grupos de forma independiente:

- ***Grupo 1***

Los puntos situados en esta zona, un total de 701, tienen todos en común un comportamiento similar en cuanto a las variables que definen el proceso, dicho comportamiento se detalla en la tabla mostrada a continuación.

	PC718T	*PC718D*	*SIA80*	*TE628R*	*SMA80*	*SCA80*	*ANCHO*	*INF-X*	*INF-Y*
Media	92,43081	87,42082	88,97318	481,4179	-0,982881	215,788	1273,1597	526,87	709,570
Desviación	1,954443	4,573347	14,62502	26,65377	0,1919619	22,5013	15,121323	25,523	7,57135

Tabla 4. 97 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Este grupo presenta tanto errores positivos como negativos. En el caso DIN el número de errores negativos y positivos es de 317 y 184 respectivamente. En el caso DIC es de 575 y 126 y en el caso DIS es de 469 y 232.

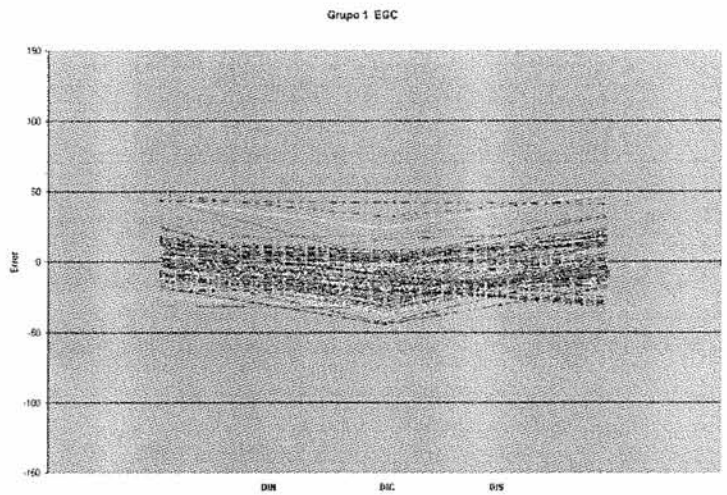

Figura 4. 75 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGC del grupo 1.

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	-9,6340694	-22,9634783	-9,80383795
Desviación	12,9953195	11,8326184	7,16323011

Tabla 4. 98 - Errores de recubrimiento negativos EGC.

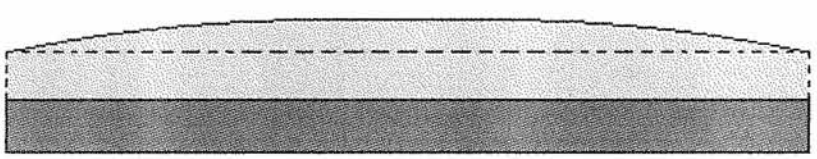

Figura 4. 76 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 1, recubrimiento EGC.

Para los errores positivos el comportamiento es el siguiente:

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	8,79947917	10,2222222	11,75
Desviación	8,79792877	14,2283598	14,5732216

Tabla 4. 99 - Errores de recubrimiento positivos EGC

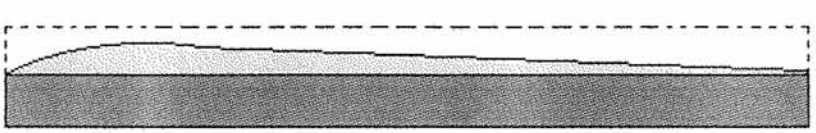

Figura 4. 77 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 1, recubrimiento EGC.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

- *Grupo 2*

El número de elementos de este grupo es de 180. Al igual que en el grupo 1, existen tanto errores positivos como negativos. El comportamiento de las variables de proceso para el total de el grupo es el siguiente:

	PC718T	*PC718D*	*SIA80*	*TE628R*	*SMA80*	*SCA80*	*ANCH*	*INF-X*	*INF-Y*
Media	90,06667	82,1667	98,3889	506,372	8,62222	324,367	1276,25	562,138	712,205
Desviación	0,513504	1,28376	5,34230	25,9608	4,15637	8,37350	13,0906	4,66864	1,96817

Tabla 4. 100 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC.

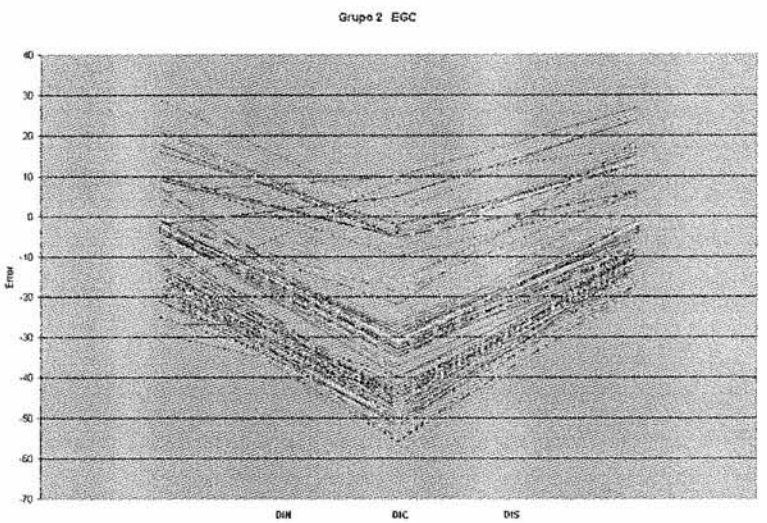

Figura 4. 78 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGC del grupo 2.

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	-12,1689189	-37,5574713	-10,26
Desviación	6,76162492	13,1480949	4,24015639

Tabla 4. 101 - Errores de recubrimiento negativo EGC

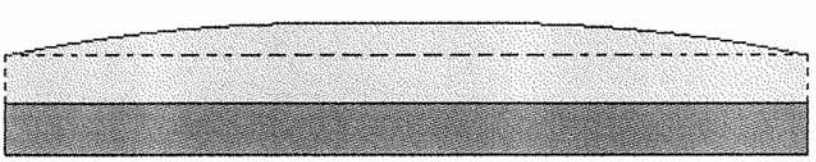

Figura 4. 79 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 2, recubrimiento EGC.

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	11,59375	5,1666667	12,233333
Desviación	7,74954473	3,65604522	7,78452636

Tabla 4. 102 - Errores de recubrimiento positivo EGC

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

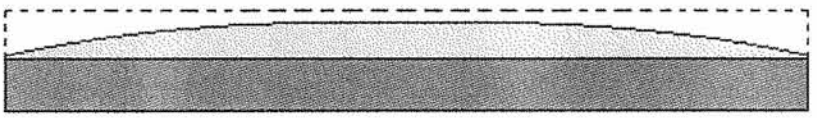

Figura 4. 80 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 2, recubrimiento EGC.

El número de errores negativos y positivos en el caso DIN es de 148 y 32 respectivamente; en el caso DIC es de 174 y 6 y en el caso DIS de 150 y 30.

- ***Grupo 3***

Este grupo está formado por un total de 39 puntos. El comportamiento de las variables de proceso para el total de el grupo es el siguiente:

	PC718T	*PC718D*	*SIA80*	*TE628R*	*SMA80*	*SCA80*	*ANCH*	*INF-X*	*INF-Y*
Media	90	82	101,279	476,205	5,48717	323,789	1365,79	564,692	712,435
Desviación	0	0	4,30429	23,2358	4,88753	10,5891	13,8852	0,89306	1,77400

Tabla 4. 103 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC

El comportamiento de los errores es el siguiente:

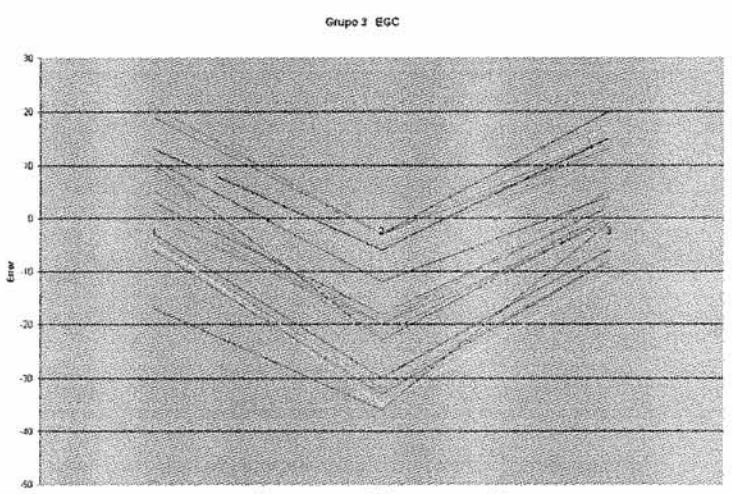

Figura 4. 81 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGC del grupo 3.

En el caso DIN hay 9 errores negativos y 30 positivos. Para DIC hay 38 negativos y solo 1 positivo, y para DIS hay 11 negativos y 28 positivos

	Error Norte	*Error Centro*	*Error Sur*
Media	-17,222221	-19,8157895	-6,7
Desviación	32,4568089	10,1498376	4,37289632

Tabla 4. 104 - Errores de recubrimiento negativos EGC.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Figura 4. 82 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 3, recubrimiento EGC.

	Error Norte	Error Centro	Error Sur
Media	9,1333333	9,3	5,17241379
Desviación	6,25731756	0	6,27960966

Tabla 4. 105 - Errores de recubrimiento positivos EGC.

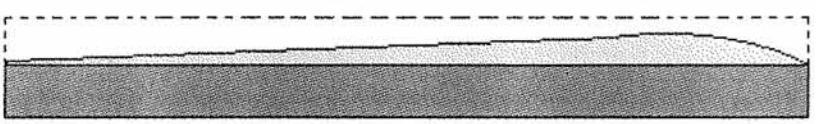

Figura 4. 83 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 3, recubrimiento EGC.

- ***Gupo 4***

El número de puntos es de 39

	PC718T	PC718D	SIA80	TE628R	SMA80	SCA80	ANCH	INF-X	INF-Y
Media	94	88	1,23076	513,512	-0,07692	56,6564	1266	540	694
Desviación	0	0	4,72769	19,0219	0,26995	7,80490	0	0	0

Tabla 4. 106 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC

Los errores son siempre negativos. En el caso DIN y DIS el error siempre vale –13 y en el caso DIC siempre toma el valor –32 .

- ***Grupo 5***

El número de puntos de este grupo es de 142.

Comportamiento de las variables de proceso

	PC718T	PC718D	SIA80	TE628R	SMA80	SCA80	ANCH	INF-X	INF-Y
Media	93,97183	90,7746	73,1239	476,422	-0,99295	218,549	1121,5	536,38	700,03
Desviación	0,335672	1,96203	27,7075	33,4804	0,08391	39,7303	30,667	9,2474	18,197

Tabla 4. 107 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Tanto para el caso DIN, como para el DIC el número de errores positivos es de 71 y el de negativos de 71; mientras que para el caso DIS el número de positivos es de 111 y el de negativos de 31.

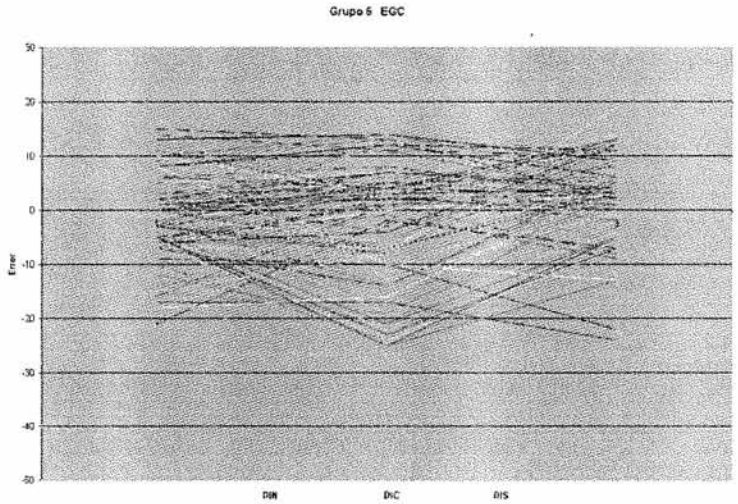

Figura 4. 84 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGC del grupo 5.

	Error Norte	Error Centro	Error Sur
Media	-7,15492958	-14,7746479	-7,19334839
Desviación	5,79075097	14,9343298	5,38775992

Tabla 4. 108 - Errores de recubrimiento negativos EGC

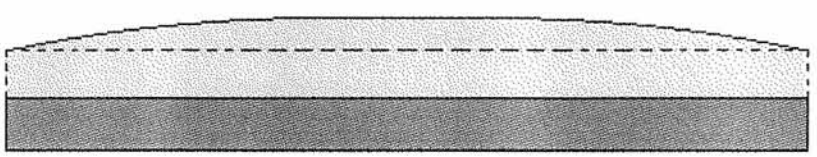

Figura 4. 85 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 5, recubrimiento EGC.

	Error Norte	Error Centro	Error Sur
Media	5,28169014	5,8628169	7,11711712
Desviación	4,76949563	4,08698184	11,9192272

Tabla 4. 109 - Errores de recubrimiento positivos EGC.

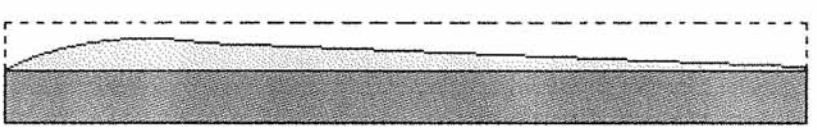

Figura 4. 86 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 5, recubrimiento EGC.

- ***Grupo 6***

El número de puntos de este grupo es de 65.Comportamiento de las variables de proceso.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

	PC718T	PC718D	SIA80	TE628R	SMA80	SCA80	ANCH	INF-X	INF-Y
Media	94	92	23,4123	449,938	-1	309,132	1015,2	535,36	717,07
Desviación	0	0	0,61758	1,56001	0	7,18588	7,5999	4,6722	1,6422

Tabla 4. 110 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC

El número de errores negativos y positivos para el caso DIN es de 46 y 19 respectivamente. Para el caso DIC de 6 y 59 y para el caso DIS de 57 y 8.

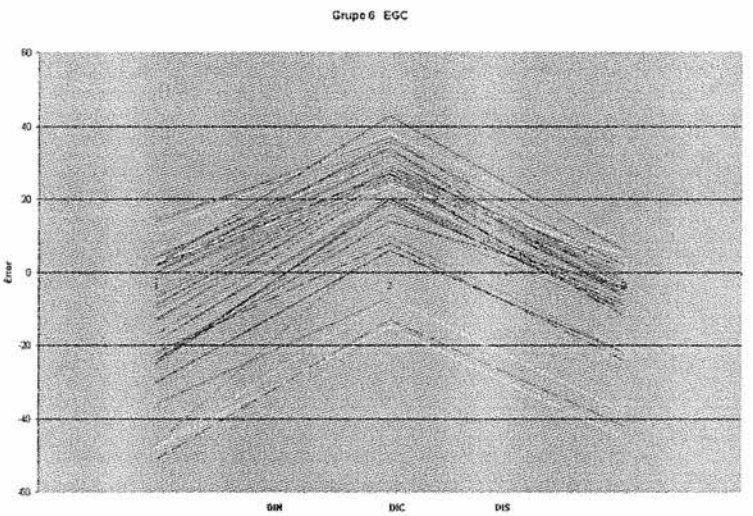

Figura 4. 87 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGC del grupo 6.

	Error Norte	Rec_obje – Rec_DIC	Error Sur
Media	-17,0652174	-20,1666667	-10,3859649
Desviación	14,9434522	21,3393221	10,0831443

Tabla 4. 111 - Errores de recubrimiento negativos EGC

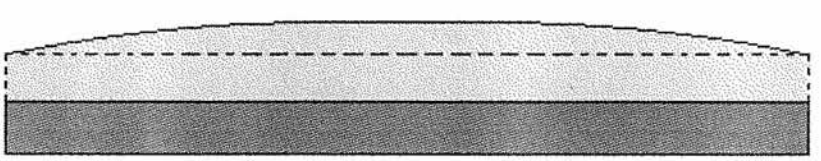

Figura 4. 88 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 6, recubrimiento EGC.

	Error Norte	Error Centro	Error Sur
Media	4,05263158	26,3728814	3,625
Desviación	4,45313479	7,16769165	2,97309363

Tabla 4. 112 - Errores de recubrimiento positivos EGC.

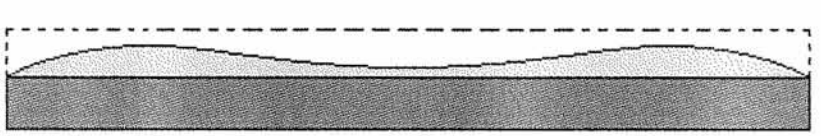

Figura 4. 89 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 6, recubrimiento EGC.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

- ***Grupo 7***

El número de puntos de este grupo es de 26.Comportamiento de las variables de proceso

	PC718T	*PC718D*	*SIA80*	*TE628R*	*SMA80*	*SCA80*	*ANCH*	*INF-X*	*INF-Y*
Media	93,38461	90,4615	61,1692	454,807	7,65384	336,884	1012,3	549,38	710,42
Desviación	1,471785	3,67946	4,24987	4,42736	4,73237	54,0880	11,895	6,1908	8,3769

Tabla 4. 113 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC

El número de errores negativos y positivos para el caso DIN es de 20 y 6, para el caso DIC de 2 y 24 y para el caso DIS de 14 y 12

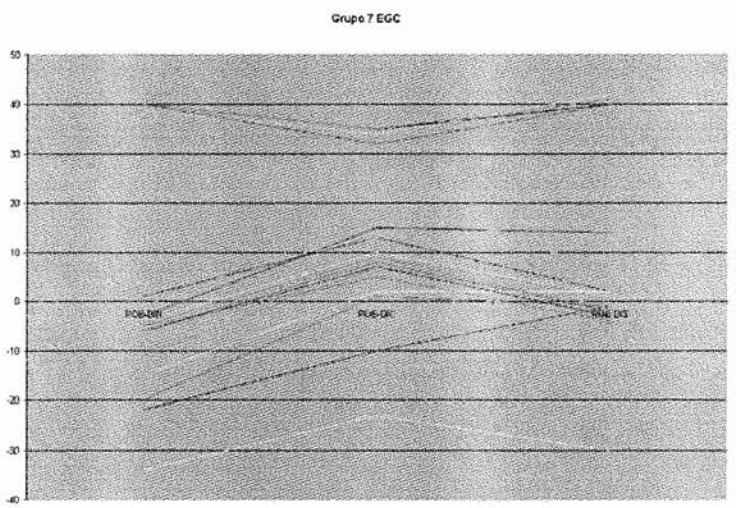

Figura 4. 90 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGC del grupo 7.

La evolución de el error de recubrimiento esta influenciado directamente como era de esperar por la variación de la posición relativa de la cuchilla a la banda.

	Error Norte	*Rec_obje – Rec_DIC*	*Error Sur*
Media	-8,65	-16,5	-4,92857143
Desviación	8,1258198	9,19238816	7,54947054

Tabla 4. 114 - Errores de recubrimiento negativos EGC

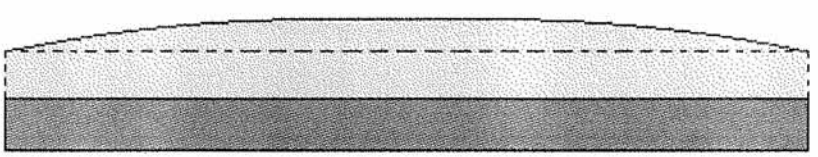

Figura 4. 91 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 7, recubrimiento EGC.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

	Error Norte	Error Centro	Error Sur
Media	27,1666667	12,7083333	17,25
Desviación	19,508118	10,3649877	17,8739272

Tabla 4. 115 - Errores de recubrimiento positivos EGC.

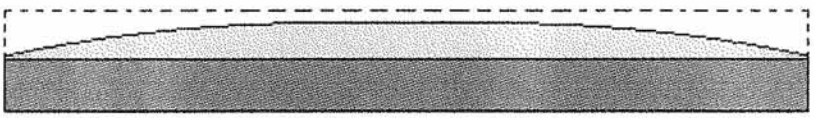

Figura 4. 92 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 7, recubrimiento EGC.

4.3.2.6 Selección de Grupos de Trabajo

Recubrimiento EGA

Los grupos que mejor comportamiento presentan son:

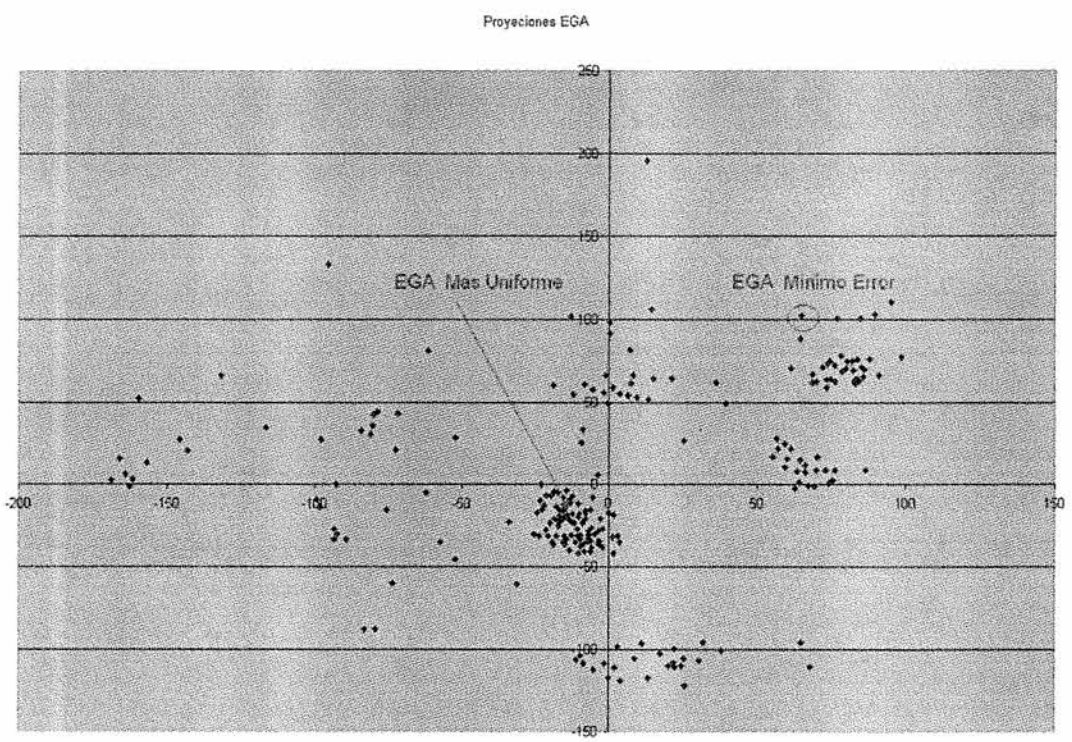

Figura 4. 93 – Dos mejores puntos EGA.

- Grupo 3 presenta errores de exceso de recubrimiento razonablemente pequeños, con desviaciones aceptables, aunque la forma final de la lamina no es uniforme.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Figura 4. 94 - Perfil de recubrimiento para mejor grupo EGA (en atención al mínimo error).

- Grupo 4 Los errores son de mayor cuantía y con variaciones considerables pero la forma final de la lamina es mucho mas uniforme.

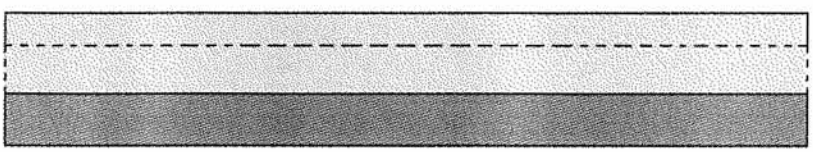

Figura 4. 95 - Perfil de recubrimiento para mejor grupo EGA (en atención a la uniformidad).

Recubrimiento EGB

Los grupos que mejor comportamiento presentan son:

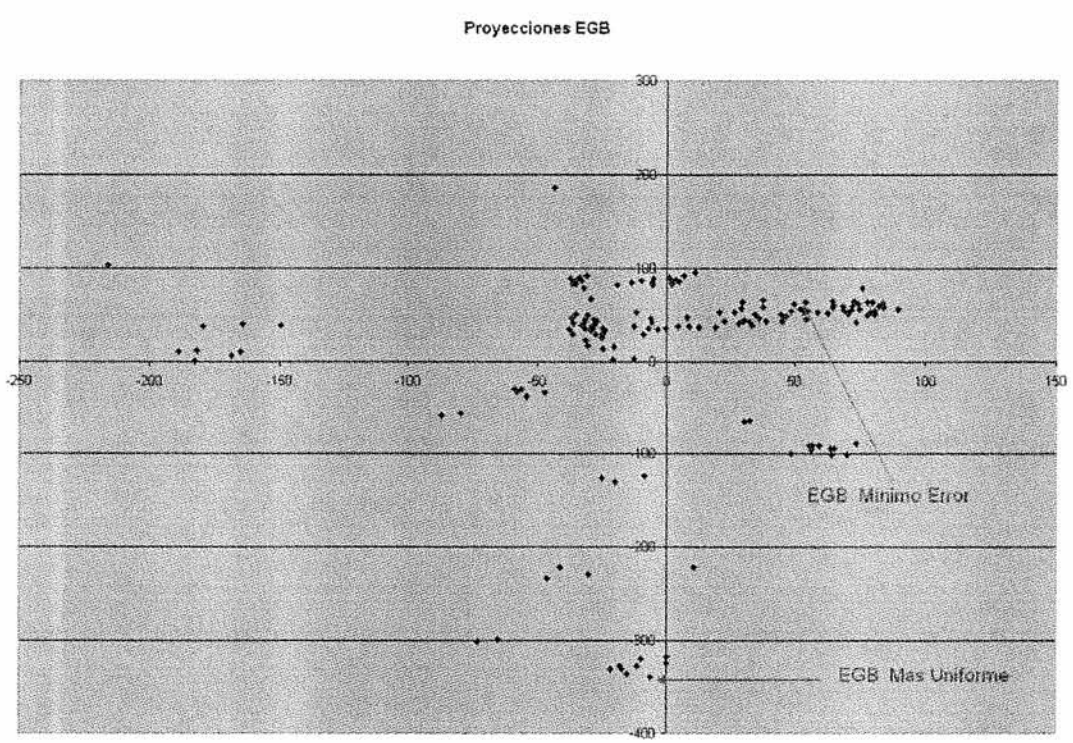

Figura 4. 96 – Dos mejores puntos EGB.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

- Grupos 1 y 2 presenta errores de exceso de recubrimiento muy pequeños, con desviaciones aceptables, aunque la forma final de la lamina no es uniforme.

Figura 4. 97 - Perfil de recubrimiento para mejor grupo EGB (en atención al mínimo error).

- Grupo 5 Los errores son de mayor cuantía y con variaciones considerables pero no existen errores por defecto de recubrimiento.

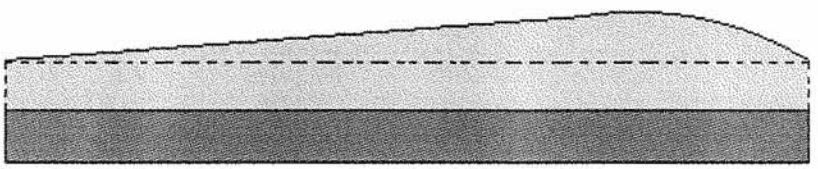

Figura 4. 98 - Perfil de recubrimiento para mejor grupo EGA (en atención a la uniformidad).

Recubrimiento EGC

Los grupos que mejor comportamiento presentan son:

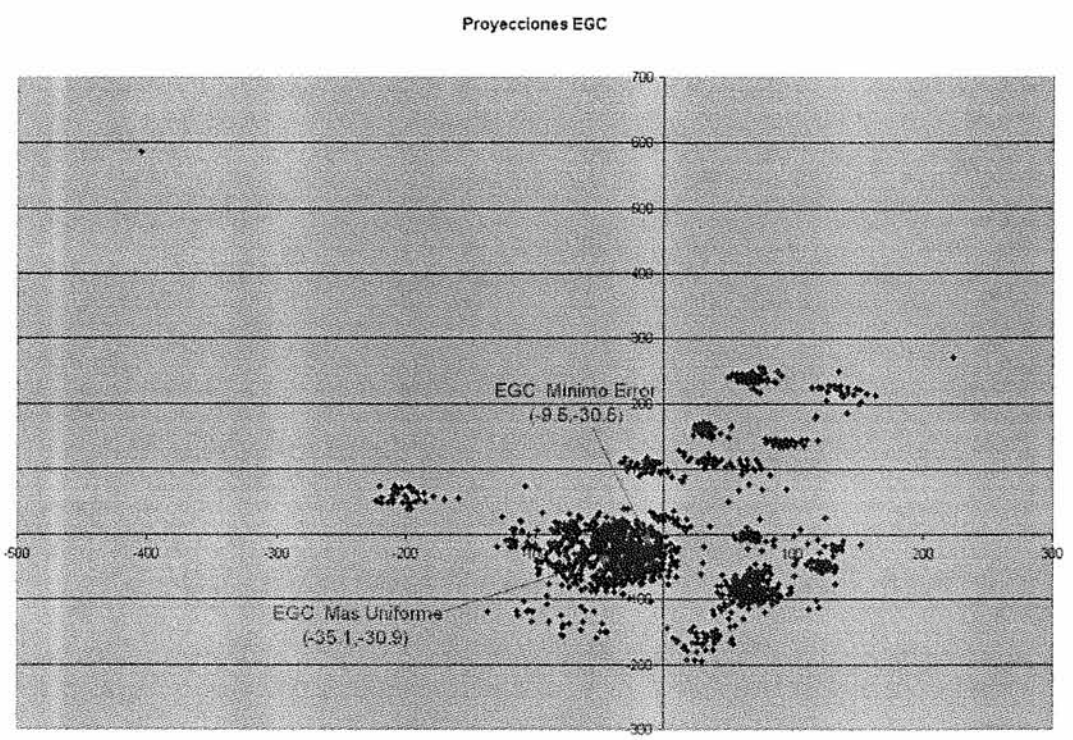

Figura 4. 99 – Dos mejores puntos EGC.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

- Grupo 5 presenta errores de exceso de recubrimiento razonablemente pequeños, con desviaciones aceptables, aunque la forma final de la lamina no es uniforme y además presenta errores por defecto (estos sí que se comportan de manera uniforme).

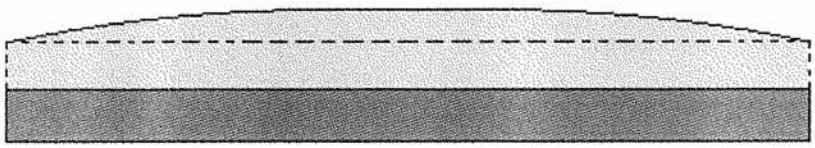

Figura 4. 100 - Perfil de recubrimiento para mejor grupo EGC (en atención al mínimo error).

- El resto de los grupos presentan características similares sin que se encuentre ninguno que determine perfiles uniformes

4.3.2.7 Distribución Espacial del Perfil de Recubrimiento

Las *Figuras 4.101*, *4.102* y *4.103*, muestran como se distribuye el perfil de recubrimiento que adquiere la banda tras pasar entre las cuchillas de soplado para los recubrimientos EGA, EGB y EGC respectivamente.

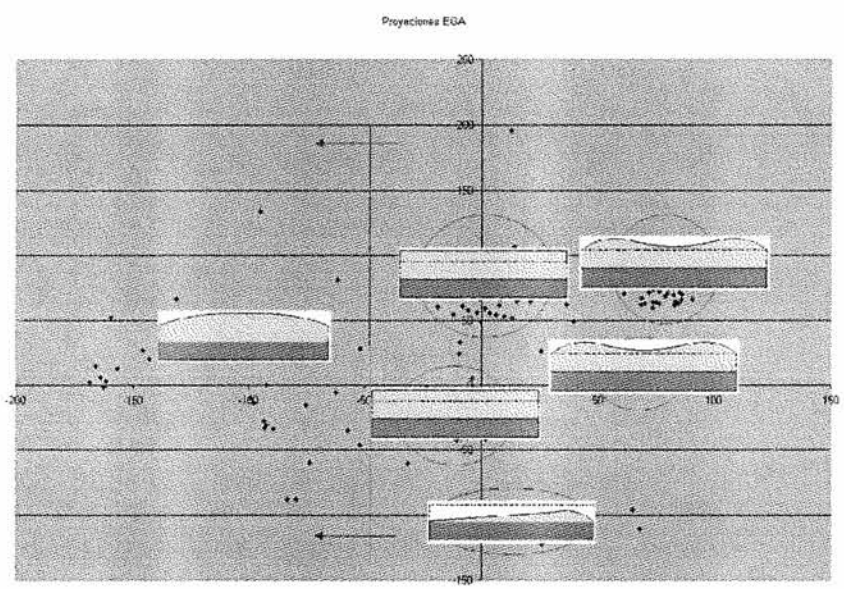

Figura 4. 101 – Distribución espacial de los perfiles de banda para recubrimiento EGA.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

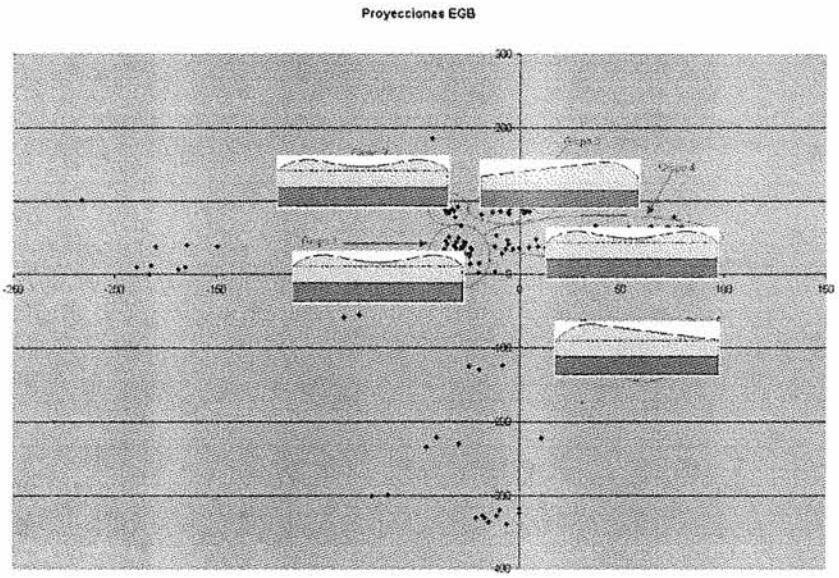

Figura 4. 102 – Distribución espacial de los perfiles de banda para recubrimiento EGB.

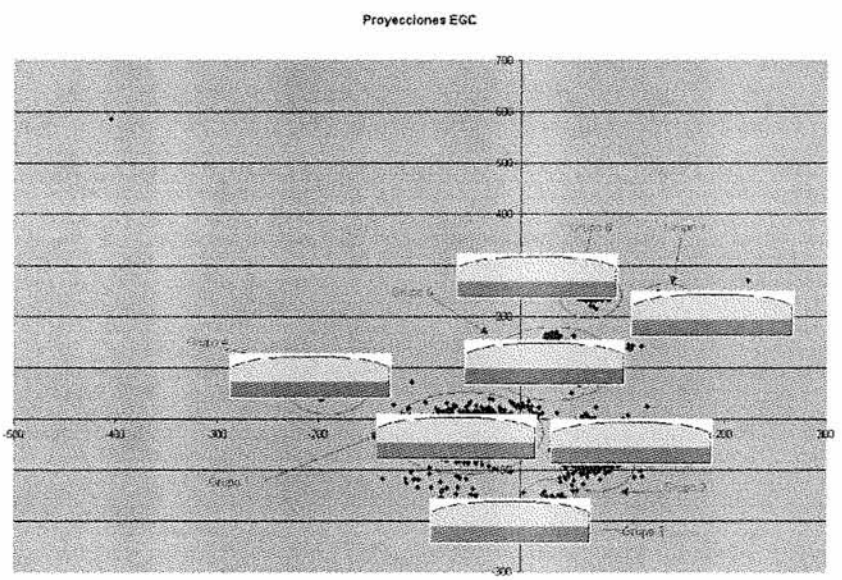

Figura 4. 103 – Distribución espacial de los perfiles de banda para recubrimiento EGC.

4.3.3 Empleo de Redes Neuronales

Se emplean redes neuronales con dos fines claramente diferenciados, para estimar la posición relativa de las cuchillas a la banda dada una serie de condiciones de sistema (variables de entrada a la red), y para determinar a que grupo pertenecerá un punto caracterizado por un valor concreto de las variables de entrada.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

4.3.3.1 Determinación de la posición de las cuchillas

Las variables de proceso que se introducirán a la red como entradas serán las la *Tabla 4.1* a excepción de la temperatura de la banda a la entrada del pote de galvanizado y las posiciones relativas de las cuchillas en ambos ejes que se tomaran como salidas.

Dado el elevado numero de entradas (10), se hace necesario incorporar un número de neuronas en la capa intermedia ligeramente superior al doble de la suma de entradas y salidas, en este caso el numero se elevará a 28 neuronas.

Se estudiaron de manera independiente tres tipos de redes distintas cuyos comportamientos en cuanto a parámetro *alpha* y rendimiento para las distintas salidas son los de las *Tablas 4.117* y *4.118*.

Topología	Ciclos	Tipo	Alpha	Rendimiento
10-28-2	60000	Quickpropagation	0.02	78%
10-28-2	60000	Estándar Backpropagation	0.32	93%
10-28-2	60000	Backpropagation WeightDecay	0.47	88%

Tabla 4. 116 - Rendimiento de la red salida INF-X.

Topología	Ciclos	Tipo	Alpha	Rendimiento
10-28-2	60000	Quickpropagation	0.02	78%
10-28-2	60000	Estándar Backpropagation	0.32	93%
10-28-2	60000	Backpropagation WeightDecay	0.47	88%

Tabla 4. 117 - Rendimiento de la red Salida INF-Y.

En función de los resultados obtenidos se opto por utilizar una red tipo *Estándar Backpropagatión*.

Se crearon tres patrones de entrenamiento independientes (cada uno con una distribución aleatoria diferente de los datos) para cada tipo de red, se entrenaron y testaron por separado obteniéndose una serie de aciertos función de la tolerancia admitida (porcentaje de error admisible) que son los de las *Tablas 4.119* y *4.120*.

Topología	Tipología	Aciertos								
		1%			5%			10%		
		P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
10-28-2	Quickpropagation	63%	68%	65%	74%	79%	75%	87%	88%	81%
10-28-2	Estándar Backpropagation	71%	74%	72%	95%	96%	96%	99%	99%	99%
10-28-2	BackpropagationWeightD	65%	65%	63%	74%	73%	71%	88%	89%	81%

Tabla 4. 118 - Aciertos porcentuales de los distintos patrones para las diferentes redes entrenadas salida INF-X.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Topología	Tipología	Aciertos								
		1%			5%			10%		
		P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
10-28-2	Quickpropagation	83%	87%	85%	93%	94%	95%	99%	99%	99%
10-28-2	Estándar Backpropagation	92%	92%	90%	99%	99%	98%	99%	99%	99%
10-28-2	BackpropagationWeightD	65%	65%	63%	94%	93%	91%	99%	99%	99%

Tabla 4. 119 - Aciertos porcentuales de los distintos patrones para las diferentes redes entrenadas salida INF-Y.

A la vista de los resultados como modelo definitivo se implemento la red de tipo *Estándar Backpropagation* escogiendo como pesos definitivos para las neuronas los resultantes de la red entrenada con el patrón denominado P2.

Como nivel de tolerancia se admite trabajar con un 5% pues un grado de tolerancia mayor estaría por encima del grado de precisión de los equipos de toma de datos.

Nótese que el elevado numero de aciertos para la posición en el eje Y (INF-Y) se debe a el menor rango de variación de los datos, lo que facilita la "decisión" a la red.

El aspecto de la red es el mostrado en la *Figura 4.104*.

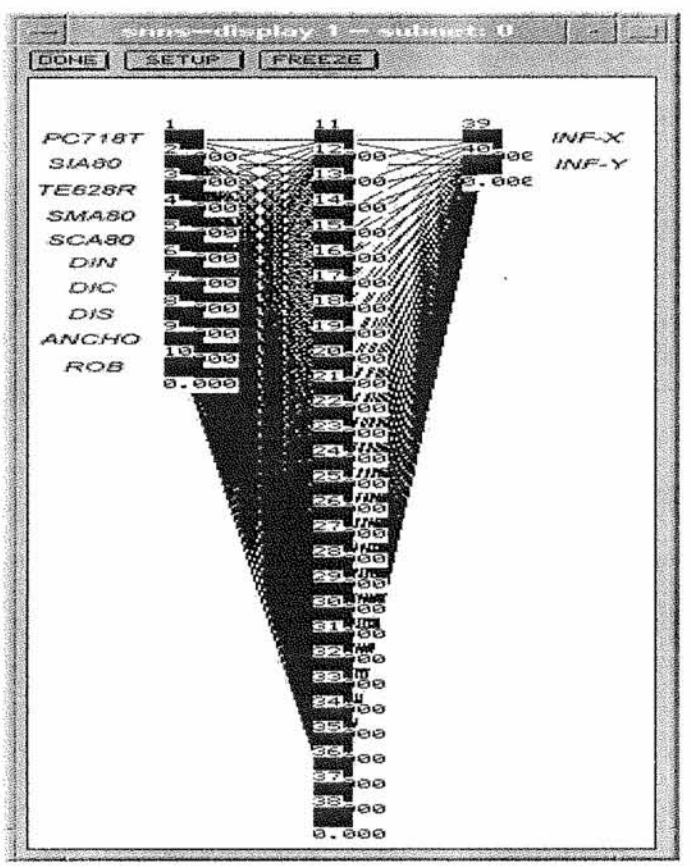

Figura 4. 104 - Distribución neuronal de la red seleccionada.

La variación del error para la red entrenada se muestra en la *Figura 4.105*.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

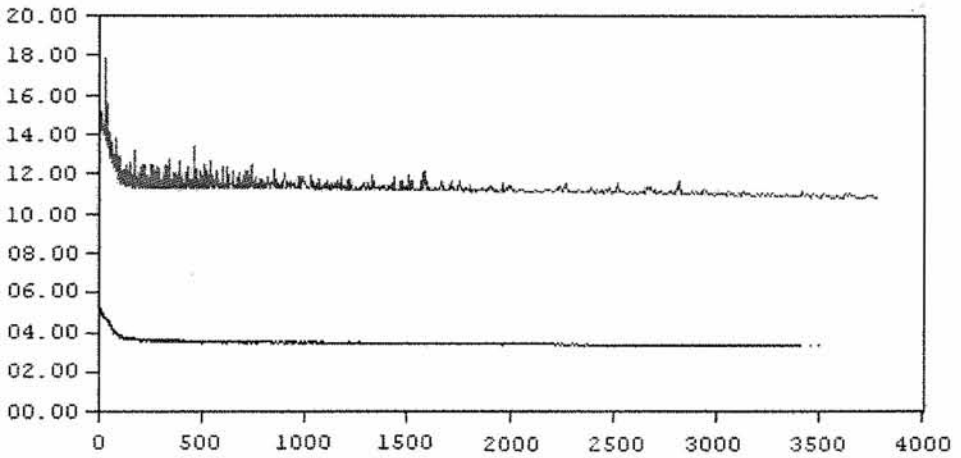

Figura 4. 105 - Variación del error patrón Test/entrenamiento.

La evolución del error para los patrones entrenados se muestra en la *Figura 4.106*, en la curva de color rojo, siendo la curva de color negro la evolución de los patrones de test, se observa una tendencia a la confluencia para valores altos, de ahí el elevado numero de ciclos de entrenamiento que precisa la red.

El hecho de que ambas curvas presenten tendencias decrecientes, sin puntos de inflexión, asegura que la red no estará sobreentrenada, es decir, que será capaz de operar adecuadamente con patrones distintos a los empleados para entrenarla.

Nótese que la evolución del error para la respuesta de la red a los patrones de entrenamiento presenta pequeños picos que son debidos al carácter aleatorio con que se introducen los patrones a la red, esta aleatoriedad permite un mayor grado de confianza en los resultados finales.

Previamente a la elección de la topología final de la red comentada se estudiaron distintas topología en las que se fraccionaron las entradas por grupos y se aplicaron a distintas salidas.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

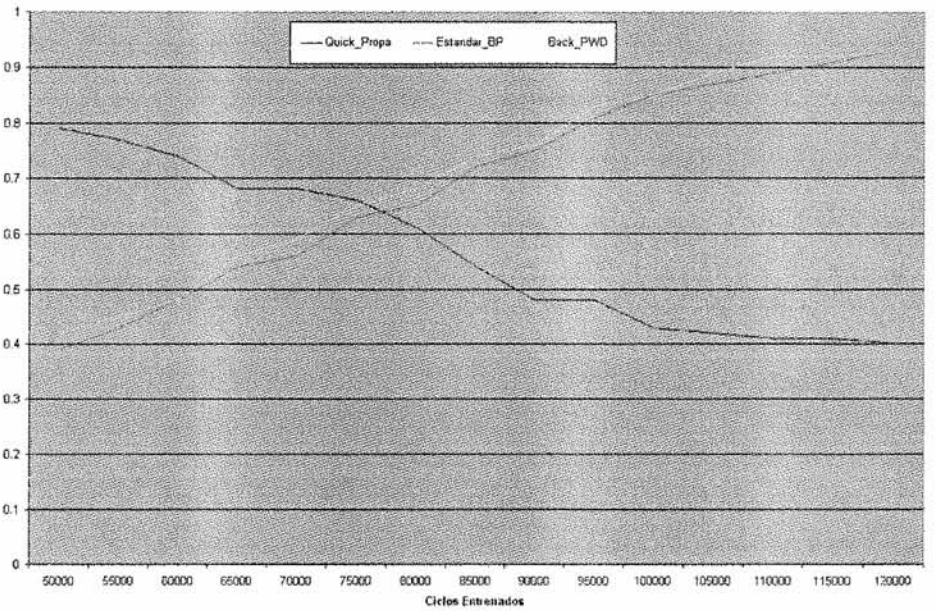

Figura 4. 106 - Evolución del rendimiento de los distintos tipos de redes empleadas al aumentar los ciclos de entrenamiento.

4.3.3.2 Resultados

Los aciertos porcentuales logrados con las diferentes redes entrenadas y con las diferentes tolerancias consideradas presentan una evolución tal como se indica en la *figura 4.107.*

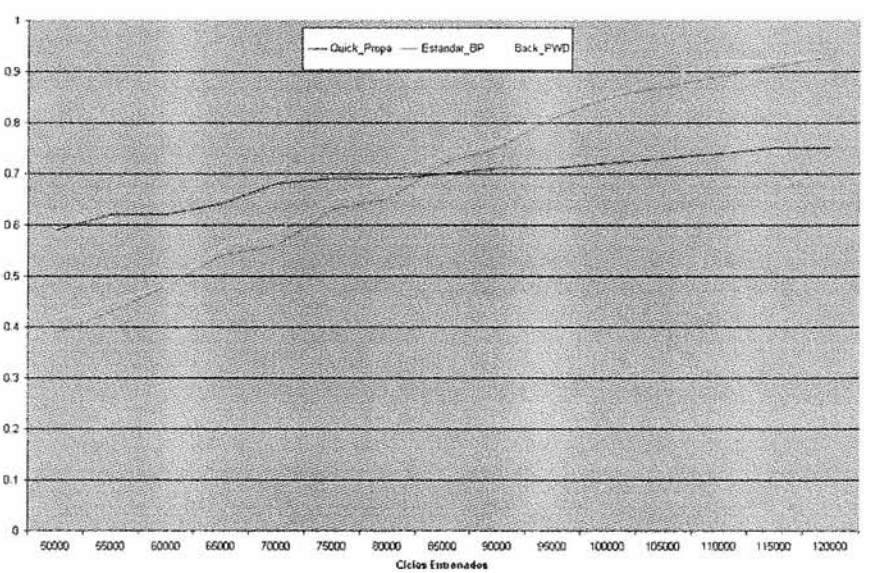

Figura 4. 107 - Evolución de los aciertos porcentuales de las redes entrenadas con respecto al numero de ciclos entrenados.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

4.3.3.3 Clasificación mediante redes neuronales

Se empleará para dicha clasificación el método de la neurona dominante. Se asigna a cada grupo de trabajo un código binario que lo identifica del resto. Este código es el que debe predecir la red al introducírsele una serie de valores de entrada. En este método se permiten tolerancias del 50%, es decir, si la neurona de salida debería tomar el valor 1, bastara con que tome un valor de 0.6 o mayor.

Las variables de proceso que se introducirán a la red como entradas serán las de la Tabla 4.1 a excepción del recubrimiento objetivo y la temperatura de la banda a la entrada del pote

Se tomaran como salidas dos neuronas N1 y N2 que representan el valor codificado de cada grupo (en el estudio solo se pretende diferenciar un grupo del resto).

La topología de esta red será mucho más sencilla debido a la elevada tolerancia permitida, siendo también mucho mayor el porcentaje de aciertos.

En este caso solo se empleo un tipo de red (Estándar Back-propagation) obteniéndose un porcentaje de acierto para una tolerancia del 50% del 97%.

Se encontró mas que suficiente este método para clasificar de esta forma las redes neuronales.

4.3.4 Desarrollo de las Simulaciones

4.3.4.1 Requisitos Hardware

El pretratamiento de los datos según son recibidos de la línea se ha realizado en un ordenador personal Pentium II®, con un disco duro de 2 Gb, y 64 Mb de memoria, funcionando bajo entorno Windows de 32 bits. Así mismo, se ha utilizado un ordenador personal Pentium II® bajo entorno Windows de 32 bits, para realizar las proyecciones Sammon. Esto ha sido así por comodidad, ya que se realizó la compilación para entorno Windows, de un código escrito en origen para sistemas Unix, por lo que haber realizado el mismo trabajo bajo este sistema operativo, no hubiera supuesto ningún problema.

Tanto para la aplicación de los algoritmos de selección de variables, como la generación de patrones para el entrenamiento de las redes y el entrenamiento en sí mismo, así como para la ejecución de las simulaciones, se ha utilizado una estación de trabajo Digital Alpha 600au, con una velocidad de reloj de 600MHz, un disco duro de 2Gb, y 192 Mb de memoria, aunque sería posible realizar el trabajo bajo cualquier otro tipo de sistema bajo entorno Unix,

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

tales como estaciones Hewlett-Packard, Silicon Graphics (SGI), e incluso ordenadores personales con sistemas Linux.

4.3.4.2 Requisitos Software

Para las proyecciones Sammon se ha utilizado código de dominio público compilado para sistemas Unix y Windows.

Los algoritmos de selección de variables y la generación de patrones para el entrenamiento de las redes se ha realizado con la ayuda de la aplicación XDPM 3.0 desarrollado por el Área de Proyectos de Ingeniería de la Universidad de Oviedo *[Bal97]*.

Las redes han sido generadas mediante el software SNNS 3.0 de la Universidad de Stuttgart *[Zel93]*, bajo sistema operativo Digital Unix.

Además se han utilizado otra serie de programas menores con el fin de obtener cierta información de los datos, o conocer el número de aciertos de las redes entrenadas.

El sistema operativo utilizado en la estación Digital Alpha, ha sido el Digital UNIX V4.0D.

4.4 Conclusiones

Para mejorar los modelos existentes (modelo de Thorton y variaciones del mismo) había dos líneas posibles de actuación. Una de ellas es estudiar las limitaciones de los modelos matemáticos existentes e intentar solventarlas mediante la incorporaciones de hipótesis que impliquen un mayor proximidad con la situación real. La otra es intentar una aproximación desde un enfoque totalmente, intentando crear una simulación tipo "caja negra" utilizando redes neuronales y otras técnicas de tratamientos de datos.

Se propone considerar la superficie de interfaz entre el aire y el zinc líquido como una membrana, y hacer la viscosidad dependiente de la temperatura lo que implica acoplar la ecuación de la energía y la de conservación de la cantidad de movimiento. Esto último hace más compleja la resolución, pero no hasta el extremo de hacerla inabordable. Se desarrollo una formulación débil de forma que pueda ser resuelto utilizando el método de elementos finitos.

Mayor avance representa el modelo generado utilizando técnicas alternativas. Se ha comprobado en este capítulo como un modelo basado en redes neuronales proporciona unos resultados muy próximos a los resultados reales. Este grado de precisión permitiría la

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

sustitución del operario por un sistema como el aquí descrito, con un mínimo riesgo, y un considerable incremento tanto en el ahorro económico como en la precisión del recubrimiento.

De entre todas las topología de redes sometidas a estudio se obtuvieron los mejores resultado con las del tipo Estándar Back Propagation que fueron las finalmente implementadas y depuradas. Utilizando una red con 28 neuronas en la capa oculta se obtiene un índice de acierto en la determinación de la posición de las cuchillas que provoca un determinado recubrimiento de, aproximadamente, un 95% para una tolerancia del 2,5%.

Utilizando el método de proyección de Sammon se clasificaron adecuadamente los diferentes datos de bobinas. Desgraciadamente, el método de Sammon es un método no analítico por lo que resulta imposible utilizarlo con el fin de clasificar nuevas bobinas. Por ello se ha desarrollado una red neuronal que realiza este mismo cometido tras ser entrenada con los datos proporcionados por la proyección de Sammon para otras bobinas. Esto permite que el sistema pueda funcionar "on-line", con una superior velocidad de proceso.

Se ha obtenido para cada tipo de recubrimiento la zona óptima de funcionamiento, que viene determinada por unos determinados valores de las variables independientes de proceso, en la que el exceso de recubrimiento es mínimo y se obtiene los mejores valores de uniformidad.

Por último, se llegan a unos resultados muy prometedores, especialmente para aquellos recubrimientos más difíciles de lograr (EGA y EGB), lo que permite esperar unas mejoras económicas importantes.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Capítulo 5

Conclusiones y Líneas de Futuro

- Los resultados del presente estudio confirman que el proceso de recubrimiento de zinc controlado por cuchillas de aire es modelable, y por lo tanto resulta factible realizar una predicción de la posición de estas para lograr unas condiciones finales de recubrimiento dadas.

- Los modelos analíticos existentes hasta el momento presentan serias limitaciones debido a las suposiciones realizadas *(apartado 2.2.2)*. Se propone aquí una nueva formulación, más coherente, que sustituye las condiciones anteriores, por otras mucho más ajustadas a las condiciones reales de proceso.

- Las proyecciones se muestran muy útiles para el estudio de influencias de variables sobre el recubrimiento obtenido.

- Las variables seleccionadas permiten determinar el perfil a obtener tras el proceso físico de recubrimiento mediante la visualización de su proyección, o mediante la red neuronal asociada a este. Esta predicción es mucho mejor en el caso de los recubrimientos menos habituales (EGA y EGB) por lo que se esperan beneficios muy apreciables.

- El tratamiento diferenciado de las bandas con diferente tipo de recubrimiento mejora en gran medida frente al tratamiento global. Esta mejora se refleja también en la proyección Sammon.

- Se prueba la extraordinaria influencia de algunas variables no consideradas básicas hasta el momento, especialmente el ancho y la tensión.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

- El modelo conexionista predice las posiciones de las cuchillas con un porcentaje de aciertos del 94% para una tolerancia del 5% la posición horizontal de la cuchilla, y del 99% en el caso de la posición vertical, con la misma tolerancia, *(apartado 4.4.1)*. Este resultado permite sustituir al operador sin riesgos de operación, con el correspondiente ahorro y mejora predictiva

- Este trabajo de investigación abre nuevas vías hacia la posibilidad de realización de un modelado analítico del problema y su resolución por los métodos de elementos o volúmenes finitos, que permitiría la optimización de las formas de las cuchillas, y el ataque a defectos transversales, fundamentalmente en los bordes.

- Un estudio más detallado puede permitir generar un rango continuo de recubrimientos, sin limitación a los tres tipos aquí estudiados, pudiendo producir, con costes mucho más ajustados, a la calidad exacta exigida por el cliente.

- Por último comentar la posibilidad abierta a nuevos sistemas de supervisión de la calidad de soplado de las cuchillas, como pueden ser las imágenes termográficas. Estas hacen posible la inspección del soplado de dicha cuchilla, sin necesidad de retirarla de la línea de producción, reduciendo el coste de operación, y permitiendo una disminución de los intervalos de tiempo entre verificaciones, con el consiguiente aumento de la calidad.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Referencias

[Ana97] Anabuki Y., Yoshioka T., Shinohara A. (1997) "Coating Weight Control at Kawasaki Steel Continuous Galvanizing Line", Iron and Steel Engineer, 37-39.

[And88] Anderson A., Rosenfeld, E., (1988) *Neurocomputimg: Foundations of Research.* MIT Press, Cambridge, MA.

[Asa93] Asakawa, (1993) Fujitsu Science and Technology Journal 29(3) pp. 195-200.

[Bal97] Balsera, J., (1997) "Entorno Gráfico de Tratamiento de Datos de Proceso". Proyecto Fin de Carrera, E.T.S.I.I e I.I. de Gijón. Universidad de Oviedo.

[Bel98] Bellomo, P., Milone, M., Spaccarotella, A., Sanarico, M, Vicino, F. (1998) "Stainless Steel Slab Surface Quality Prediction by Means of Artificial Neural Networks", Applications of Artificial Neural Network Systems in the Steel Industry, ECSC Workshop, Bruselas, 22-23 Enero 1998, pp. 181-193.

[Bra67] Bradshaw, A.V., Wakelin, D., (1967) *Heat and Mass Transfer in Process Metalurgy*, A.W.D. Hills. Institution of Minig and Metalurgy, Londres, 1967.

[Bra92] Braun H., Riewdmiller M., (1992) "Rprop: a fast adaptative learning algorithm", En Proc. of the Inst. Symposium on Computer and Information Science VII.

[Car87] Carpenter G. A., Grossberg S., (1987) "A massively parallel architecture for a self-organizing neural pattern machine", Computer Vision, Graphics, and Image Processing 37, 54-115.

[Car88] Carpenter G. A., Grossberg S., (1988) "The ART of Adaptive Resonance Theory by a self-Organizing Neural Network", IEEE Computer, 21(3), 77-88.

[Coo71] Cooley, W.W., Lohnes, P.R., (1971) *Multivariate Data Analysis*, New York: Wiley.

[COT98] COTEC, Documentos sobre oportunidades tecnológicas., (1998) "Redes Neuronales", Diciembre 1998, 1ª Ed.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

[CSI85] CSI Planos, Dirección de Recursos Humanos, (1985). "Línea de Galvanizado de Avilés, Descripción General de la Línea". Avilés (Asturias)

[Dav95] Davene J., Dondin L., Kim J.K., Kim S.J. (1995) "Dynamic Air Knives: DAK", Galvatech '95 Conference Proceedings, 205-213.

[Dem92] Demartines, P. (1992) "Analyse de données par réseaux de neurones auto-organisés". Tesis doctoral presentada ante el Institute National Polytechnique de Grenoble.

[Dem93] Demartines, P., Hérault, J. (1993). "Representation of non-linear data structures through fast VQP neural networks". En Neuromines, pp. 411-425, Octubre.

[Dem95] Demartines, P., Hérault, J. (1995) "CCA: Curvilinear Component Analysis", Proc. of 15th workshop GRETSI.

[Dur96] Durany J., Quintela P., Vázquez C. (1996) "Simulación y Resolución Numérica de Problemas de Frontera Libre", VII Escuela de Otoño Hispano-Francesa sobre Simulación Numérica en Física e Ingeniería, Tomo II,1-103.

[Eche96] Echevarría R. (1996) "Resolución Efectiva de las EDP de Navier-Stokes por Métodos de Elementos Finitos", VII Escuela de Otoño Hispano-Francesa sobre Simulación Numérica en Física e Ingeniería, Tomo II, pp.193-284.

[Eng96] Engelman, M.S., Ramanan, N., (1997) "An Algorithm for Simulation of Steady Free Surface Flows", International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol 22, pp 103-120.

[Fal88] Falhman S. E., (1988) "Faster learning variations on back-propagation: An empirical study", Conectionist Models Summer School. T.J.Sejnowski, G.E. Hinston y D.S. Touretzky (Eds.), San Mateo, CA, EEUU.

[Fal91a] Falhman S. E., Leberie C., (1991) "The Cascade Correlation learning architecture", Technical Report CMU CS 90 100, School of Computer Science, Carnegie Mellon University.

[Fal91b] Falhman S. E., (1991) "The Recurrent Cascade Correlation learning architecture", Technical Report CMU CS 91 100, School of Computer Science, Carnegie Mellon University.

[Fin99] Fínez Martínez D., (1999) "Modelización Avanzada del Proceso de Enfriamiento del Tren de Chapa Gruesa", Proyecto Fin de Carrera, E.T.S.I.I e I.I. de Gijón, Universidad de Oviedo. Junio 1999.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

[Fis36] Fischer, R. A. (1936). "The use of multiple measurements in taxonomic problems", Ann. Eugenics 7, 178-188.

[Fue99] Fuentes Cernuda C., (1999) "Optimización del Modelo de Fuerza (DAT) del Tren de Chapa Gruesa de ACERALIA-Veriña", Proyecto Fin de Carrera, E.T.S.I.I e I.I. de Gijón, Universidad de Oviedo. Marzo 1999.

[Fuk75] Fukushima, K., (1975) "Cognitron: a self organizing multilayered neural network", Biological Cybernetics 20.

[Fuk88] Fukushima, K., (1988) "Neocognitron: a hierarchical neural network capable of visual pattern recognition", Neural Networks 1, 119-130.

[Gon99] González Rodríguez, J.A., (1999) "Predicción de la Calidad de Bandas Laminadas en Caliente Mediante Modelos Inteligentes", Tesis Doctoral defendida ante la Universidad de Oviedo, Marzo 1999.

[Gro76] Grossberg S., (1976) "Adaptive pattern classification and universal recoding I II", Biological Cybernetics 20, 121-136.

[Gui91] Guinea, D., Ruiz, A., Barrios, L.J., (1991) "Multi-sensor Integration – An Automatic Feature Selection and state identification Methodology for Tool Wear Estimation", Computers in Industry, Vol 17, Nr. 2&3, L. Monostori (Ed.), pp. 121-130, Elsevier, Nov 1991.

[Heb61] Hebek A., (1961). "Metal Finish J.", vol. 80, p. 298

[Hir81] Hirt, C.W., Nichols, B.D., (1981). "Volume of Fluids (VOF) Method for the Dinamics of Free Boundaries.", J. Comput.,39:202-225, 1981.

[Hop82] Hopfield J. J., (1982) "Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities", Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, vol. 79, 2554-2558.

[Hop84] Hopfield J. J., (1984) "Neurons with graded response have collective computational properties like those of Two-State Neurons", Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, vol. 81, 3088-3092.

[Iwa98] Iwamoto H., Yamauchi A., Hasegawa Y., Isono T. (1998) "A New Air Knife System with Adjustable Lip Gaps for Hot Dip Galvanizing", Proceedings of the 4th International Conference on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet (Galvatech '98), 757-762.

[Kap97] Kapellner A. (1997) "New Developments in Skinpassing for Hot Dip Galvanizing Lines", Iron and Steel Engineer, 39-42.

[Koh77] Kohonen T., (1977) "Associative memory: a system theoretical approach", Spring Verlag, Berlin.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

[Koh82] Kohonen T., (1982) "Self organizing formation of topologically correct feature maps", Biological Cybernetics, 43, 59-69.

[Koh88] Kohonen, T. (1988) *Self-organized formation of topologically correct feature maps*. Ed. Springer-Verlag.

[Kru73] Kruskal, J. B. (1973) "Comments on a nonlinear mapping for data structure analysis", IEEE Trans. Comput. C20, 1614.

[Lai98] Laine, J. (1998) "Analysing and Monitoring of Continuous Casting Mould with the Self-Organizing Map", Applications of Artificial Neural Network Systems in the Steel Industry, ECSC Workshop, Bruselas, 22-23 Enero 1998, pp. 151-155.

[Lev98] Levén, J. (1998) "Integrated Simulations of Multi Pass Hot Rolling and its Applications in Process Control by Artificial Intelligence", Applications of Artificial Neural Network Systems in the Steel Industry, ECSC Workshop, Bruselas, 22-23 Enero 1998, pp. 293-294.

[Lin98] Link, N. (1998) "Quality Prediction by Databased Methods", Applications of Artificial Neural Network Systems in the Steel Industry, ECSC Workshop, Bruselas, 22-23 Enero 1998, pp. 171-178.

[Lloy98] Lloyd-Jones C., Barker H.A., Worner V.J. (1998) "Investigation into Magnetic Wiping Techniques as Alternative to Gas Wiping on Hot Dip Galvanizing Lines", Ironmaking and Steelmaking 1998, Vol. 25, Nº 2, 117-123.

[Lub98] Lubrano, M., Vicino, F., Sestini, A. (1998) "Cold Strip Flatness Predictions on 20-Roll Mill Through Artificial Neural Network", Applications of Artificial Neural Network Systems in the Steel Industry, ECSC Workshop, Bruselas, 22-23 Enero 1998, pp. 263-280.

[Mal98] Malmendier M., Crahay J., Noville J-F.,Wilmotte S. (1998) "Wiping by Electromagnetic Techniques in Hot Dip Galvanizing", Proceedings of the 4th International Conference on Zinc and Zinc Alloy Coated Steel Sheet (Galvatech '98), 751-756.

[Max79] Maxwell, A. E. (1979) *Multivariate Analysis in Behavioural Research.* Chapman & Hall. Londres.

[McC43] McCulloch, W. S., Pitts, W., (1943). "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity". Bulletin of Mathematical Biophysics 5,115-133.

[Min54] Minsky M., (1954) "Neural Nets amd the Brain. Model problem". Doctoral Dissertation. Princeton University. Pricenton, N.J.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

[Min69] Minsky M., Papert, S., (1969) *Perceptrons. An introduction to computational Geometry*. MIT Press. Cambridge, MA.

[Nes97] Nesic, S., Vrhovac, M., (1997) "A Neural Network Model for CO2 Corrosion of Carbón Steel". University of Queensland, Australia.

[Nil65] Nilsson, N., (1965) *Learning Machines*. Mc-Graw-Hill. New York.

[Nie79] Niemman H., Weiss J. (1979) "A fast converting algorithm for nonlinear mapping of high-dimensional data to a plane", IEEE Trans. Comput. C28, 142-147.

[Ort96] Ortega Fernández, F., (1996) "Técnicas de Inteligencia Artificial Apicadas al Control de Calidad de Procesos Industriales", Tesis Doctoral defendida ante la Universidad de Oviedo, 1996.

[Ort98] Ortega Fernández, F., González Rodríguez, J.A. (1998) "HSM Force Pre-Setting Using Artificial Neural Networks and Statistical Techniques", Applications of Artificial Neural Network Systems in the Steel Industry, ECSC Workshop, Bruselas, 22-23 Enero 1998, pp. 239-250.

[Per77] Pérez Pérez, J.I. (1977) "Sistema de Control de Espesor para una Línea Continua de Galvanizado", Proyecto Fin de Carrera, E.T.S.I de Minas de Oviedo, Universidad de Oviedo, Dic. 1977.

[Pic98] Pican, N., Alexandre, F., Bresson, P. (1998) "Artificial Neural Networks for the Presetting of a Steel Temper Mill", Applications of Artificial Neural Network Systems in the Steel Industry, ECSC Workshop, Bruselas, 22-23 Enero 1998, pp. 253-259

[Pla96] Plaza Villegas R.G. (1996) "Un Problema con Frontera Libre para las Ecuaciones de Navier-Stokes", Tesis Doctoral presentada ante la Universidad de México. 1996.

[Pop94] Poppe et al, (1994) Neue Techniken der Informationsverarbeitung Schlang et al (eds.).

[Rau93] Rauber, T.W., Barata, M.M., Steiger-GarÇao, A., (1993). *"A Toolbox for Analysis and Visualization of Sensor Data in Supervision"*. Tooldiag '93 – International Conference on Fault Diagnosis, %-7 April 1993, Touluse, Francia.

[Ros59] Rosenblatt F., (1959). *Principles of Neurodinamycs*, Spartan Books, New York.

[Rum85] Rumelhart D. E., Zipser D., (1985) "Feature discovery by competitive learning". Cognitive Science 9, 75-112.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

[Rum86] Rumelhart, D. E., McClelland, J. L. (1986) "Parallel Distributive Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition", Vol.1., MIT Press.

[Sam69] Sammon, J. W. Jr. (1969) "A nonlinear mapping for data structure analysis", IEEE Trans. on Comput. C18(5): 401-409. May 1969.

[Sch87] Schlichting H., Kestin J. (1987) "*Boundary Layer Theory*", Ed. McGraw Hill, New York.

[Sha77] Sharma, S.K., Hlinka, J.W., Kern, D.W. (1977) Iron and Steel Maker, Vol. 4, nº7.

[Sin95] Singh, H., Deo, B. (1995) I&SM, Indian Institute of Technology, Kanpur, Oct. 1995.

[Sjö95] Sjöberg, J., (1995) *Non-Linear System Identification with Neural Networks*. Ed. Linköpings Tryckeri AB 1995.28.

[Son92] Sontag E. D., (1992) "Feedforward Nets for Interpolation and classification", Computer J, System Sciences 45, 20-48.

[Sör98] Sörgel, G., Poppe, T., Schlang, M. (1998) "Real Time Control with Neural Networks in Steel Processing", Applications of Artificial Neural Network Systems in the Steel Industry, ECSC Workshop, Bruselas, 22-23 Enero 1998, pp. 209-250.

[Sta92] Staib et al, (1992) IJCNN 3 pp 1-9.

[Sze88] Szekely, J. (1988) *Fenómenos de Flujo de Fluidos en Procesamiento de Metales*, Ed. Limusa, México.

[Tal65] Tallmadge, J.A. (1965), AIChEJ, 11, 403.

[Tan97] Tanaka, T., Endo, H., Kamada, N., Naito, S., Kominami, H. (1997), "Trouble Forecasting System by Multi-Neural Network on Continuous Casting Process of Steel Production". Nippon Steel Corp., Yawata Works.

[Tho76] Thornton J.A., Graff H.F. (1976) "An Analytical Description of the Jet Finishing Process for Hot-Dip Metallic Coatings on Strip", Metallurgical Transactions B, Vol. 7B, 607-618.

[Wer74] Werbos, P. J., (1974) "Beyond regression : New tools for prediction and analysis in the behavioural sciences", Harvard University, Masters Thesis.

[Wid60] Wildrow, B., Hoff, M. E. (1960) "Adaptive switching circuits", in 1960 IRE WESCON Convention Record, New York, 96-104.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

[Wil60] Wildrow, B., Hoff, M. E. (1960) "Adaptive switching circuits", in 1960 IRE WESCON Convention Record, New York, 96-104.

[Zel93] Zell, A. y otros. (1993) "SNNS, Stuttgart Neural Network Simulator. User Manual Version 3.0", Report, Nº 3/93.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Anexo I

Matrices de Correlación

	PC718T	SIA80	TE628R	SMA80
PC718T	1	-0.33277	-0.1717	-0.08264
SIA80	-0.33277024	1	0.23565	0.02702
TE628R	-0.17173506	0.23565	1	0.23801
SMA80	-0.08263572	0.02702	0.23801	1
SCA80	-0.03958421	-0.01653	-0.0173	0.70115
DIN	-0.07453683	0.07765	-0.0988	-0.18515
DIC	-0.34696511	0.22945	-0.005	-0.1674
DIS	-0.09953113	0.10521	-0.0677	-0.20924
ANCHO	-0.32980907	0.36967	0.17336	0.04601
INF-X	0.17071812	0.07988	0.13683	0.41156
INF-Y	-0.11789519	0.19884	0.01444	0.03167
ROB	-0.10318644	0.08554	-0.0693	-0.23558

	SCA80	DIN	DIC	DIS
PC718T	-0.0396	-0.075	-0.34697	-0.09953
SIA80	-0.0165	0.0776	0.229452	0.105214
TE628R	-0.0173	-0.099	-0.00502	-0.06772
SMA80	0.7012	-0.185	-0.1674	-0.20923
SCA80	1	-0.178	-0.25314	-0.21516
DIN	-0.1782	1	0.793739	0.863166
DIC	-0.2531	0.7937	1	0.798533
DIS	-0.2152	0.8632	0.798534	1
ANCHO	-0.0917	0.0366	0.332145	0.103664
INF-X	0.3094	-0.237	-0.27416	-0.28651
INF-Y	0.0218	-0.047	-0.06474	-0.03677
ROB	-0.1754	0.7741	0.740721	0.769383

	ANCHO	INF-X	INF-Y	ROB
PC718T	-0.32981	0.17072	-0.117895	-0.10318644
SIA80	0.36967	0.07988	0.1988354	0.08554049
TE628R	0.17336	0.13683	0.0144360	-0.06925148
SMA80	0.04601	0.41156	0.0316679	-0.23558443
SCA80	-0.0917	0.30938	0.0218052	-0.17543305
DIN	0.03659	-0.23671	-0.0474005	0.77411836
DIC	0.33214	-0.27416	-0.0647384	0.74072116
DIS	0.10366	-0.28652	-0.0367766	0.76938363
ANCHO	1	0.06668	-0.0088017	0.09076837
INF-X	0.06668	1	0.0141740	-0.20303981
INF-Y	-0.0088	0.01417	1	-0.08128076
ROB	0.09077	-0.20304	-0.0812806	1

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Anexo II

Listados de los Resultados de los Algoritmos de Selección

Algoritmo Univariante

```
----------------------------------------------------------

       CLASES OBJETO :    7
     Nr.  de muestras:          214
     Nr. de caracteristicas:          9
                                   Nr. muestras
 Nr.   1 :                   6      57   26.64%
 Nr.   2 :                   5      41   19.16%
 Nr.   3 :                   8       8    3.74%
 Nr.   4 :                   4      19    8.88%
 Nr.   5 :                   7      26   12.15%
 Nr.   6 :                   2      25   11.68%
 Nr.   7 :                   1      38   17.76%
----------------------------------------------------------

Proceso UNIVAR
Opcion : 8 variables seleccionadas de 9
Variable en la columna final  DIC


--- COLUMNAS SELECCIONADAS--- : 8
Nr.    1 =    5  --- Criterio = -16.44187      Nombre: SCA80
Nr.    2 =    4  --- Criterio = -50.39111      Nombre: SMA80
Nr.    3 =    2  --- Criterio = -100.89801     Nombre: SIA80
Nr.    4 =    7  --- Criterio = -157.17300     Nombre: INF-X
Nr.    5 =    6  --- Criterio = -442.74799     Nombre:  ANCHO
Nr.    6 =    3  --- Criterio = -951.39484     Nombre: TE628R
Nr.    7 =    8  --- Criterio = -1064.50208    Nombre: INF-Y
Nr.    8 =    0  --- Criterio = -47619047424.00000   Nombre: PC718T
```

```
----------------------------------------------------------

       CLASES OBJETO :    4
     Nr.  de muestras:          214
     Nr. de caracteristicas:          9
                                   Nr. muestras
 Nr.   1 :                   4      80   37.38%
 Nr.   2 :                   3      44   20.56%
 Nr.   3 :                   5      27   12.62%
 Nr.   4 :                   1      63   29.44%
----------------------------------------------------------

Proceso UNIVAR
Opcion : 8 variables seleccionadas de 9
Variable en la columna final  DIC


--- COLUMNAS SELECCIONADAS--- : 8
Nr.    1 =    7  --- Criterio = -2.90489      Nombre: INF-X
```


U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

```
Nr.    2 =    5  --- Criterio = -6.01346      Nombre: SCA80
Nr.    3 =    0  --- Criterio = -7.53735      Nombre: PC718T
Nr.    4 =    1  --- Criterio = -7.53735      Nombre: PC718D
Nr.    5 =    6  --- Criterio = -15.52557     Nombre:  ANCHO
Nr.    6 =    4  --- Criterio = -18.14149     Nombre: SMA80
Nr.    7 =    8  --- Criterio = -57.38111     Nombre: INF-Y
Nr.    8 =    2  --- Criterio = -68.00925     Nombre: SIA80
```

```
-----------------------------------------------------------

        CLASES OBJETO :    3
      Nr.  de muestras:             214
      Nr. de caracteristicas:           9
                                     Nr. muestras
 Nr.    1 :                   3       79   36.92%
 Nr.    2 :                   2       72   33.64%
 Nr.    3 :                   1       63   29.44%
-----------------------------------------------------------

Proceso UNIVAR
Opcion : 8 variables seleccionadas de 9
Variable en la columna final  DIC


--- COLUMNAS SELECCIONADAS--- : 8
Nr.    1 =    7  --- Criterio = -4.51185      Nombre: INF-X
Nr.    2 =    3  --- Criterio = -4.72599      Nombre: TE628R
Nr.    3 =    4  --- Criterio = -6.36789      Nombre: SMA80
Nr.    4 =    5  --- Criterio = -7.35107      Nombre: SCA80
Nr.    5 =    8  --- Criterio = -91.91550     Nombre: INF-Y
Nr.    6 =    0  --- Criterio = -124.11584    Nombre: PC718T
Nr.    7 =    1  --- Criterio = -124.11584    Nombre: PC718D
Nr.    8 =    6  --- Criterio = -581.05438    Nombre:  ANCHO
```

Algoritmo de Covarianza Multiple

```
-----------------------------------------------------------

        CLASES OBJETO :    7
      Nr.  de muestras:             214
      Nr. de caracteristicas:           9
                                     Nr. muestras
 Nr.    1 :                   6       57   26.64%
 Nr.    2 :                   5       41   19.16%
 Nr.    3 :                   8        8    3.74%
 Nr.    4 :                   4       19    8.88%
 Nr.    5 :                   7       26   12.15%
 Nr.    6 :                   2       25   11.68%
 Nr.    7 :                   1       38   17.76%
-----------------------------------------------------------

Proceso MCOVAR
Opcion : 8 variables seleccionadas de 9
Variable en la columna final  DIC


Numero maximo de columna a seleccionar 8 de 9

--- Columnas Seleccionadas--- : 7
 Nr.    1 =    5       F-Ratio: 17.140699  Nombre : SCA80
```


U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

```
 Nr.   2 =   8      F-Ratio: 56.391716  Nombre : INF-Y
 Nr.   3 =   2      F-Ratio: 31.745567  Nombre : SIA80
 Nr.   4 =   6      F-Ratio: 13.365370  Nombre :  ANCHO
 Nr.   5 =   7      F-Ratio: 14.631471  Nombre : INF-X
 Nr.   6 =   0      F-Ratio: 6.806380   Nombre : PC718T
 Nr.   7 =   1      F-Ratio: 17.478260  Nombre : PC718D
```

```
-----------------------------------------------------------

        CLASES OBJETO :    4
      Nr.  de muestras:          214
      Nr. de caracteristicas:          9
                                   Nr. muestras
 Nr.   1 :                    4      80   37.38%
 Nr.   2 :                    3      44   20.56%
 Nr.   3 :                    5      27   12.62%
 Nr.   4 :                    1      63   29.44%
-----------------------------------------------------------

Proceso MCOVAR
Opcion : 8 variables seleccionadas de 9
Variable en la columna final  DIC


Numero maximo de columna a seleccionar 8 de 9

--- Columnas Seleccionadas--- : 8
 Nr.   1 =   8      F-Ratio: 35.388195  Nombre : INF-Y
 Nr.   2 =   5      F-Ratio: 149.390030 Nombre : SCA80
 Nr.   3 =   0      F-Ratio: 32.642235  Nombre : PC718T
 Nr.   4 =   6      F-Ratio: 11.274176  Nombre :  ANCHO
 Nr.   5 =   3      F-Ratio: 9.878018   Nombre : TE628R
 Nr.   6 =   2      F-Ratio: 8.534636   Nombre : SIA80
 Nr.   7 =   7      F-Ratio: 2.957290   Nombre : INF-X
 Nr.   8 =   4      F-Ratio: 3.028724   Nombre : SMA80
```

```
-----------------------------------------------------------

        CLASES OBJETO :    3
      Nr.  de muestras:          214
      Nr. de caracteristicas:          9
                                   Nr. muestras
 Nr.   1 :                    3      79   36.92%
 Nr.   2 :                    2      72   33.64%
 Nr.   3 :                    1      63   29.44%
-----------------------------------------------------------

Proceso MCOVAR
Opcion : 8 variables seleccionadas de 9
Variable en la columna final  DIC


Numero maximo de columna a seleccionar 8 de 9

--- Columnas Seleccionadas--- : 8
```


U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

```
Nr.   1 =   5      F-Ratio: 21.078697  Nombre : SCA80
Nr.   2 =   8      F-Ratio: 138.840057 Nombre : INF-Y
Nr.   3 =   3      F-Ratio: 8.924927   Nombre : TE628R
Nr.   4 =   6      F-Ratio: 12.232256  Nombre :  ANCHO
Nr.   5 =   2      F-Ratio: 13.338867  Nombre : SIA80
Nr.   6 =   4      F-Ratio: 11.711184  Nombre : SMA80
Nr.   7 =   7      F-Ratio: 4.895932   Nombre : INF-X
Nr.   8 =   0      F-Ratio: 0.254777   Nombre : PC718T
```

Algoritmo de Mínimo Error

Un Vecino

```
-----------------------------------------------------------

        CLASES OBJETO :    7
      Nr.  de muestras:          214
      Nr. de caracteristicas:          9
                                    Nr. muestras
 Nr.   1 :                    6      57   26.64%
 Nr.   2 :                    5      41   19.16%
 Nr.   3 :                    8       8    3.74%
 Nr.   4 :                    4      19    8.88%
 Nr.   5 :                    7      26   12.15%
 Nr.   6 :                    2      25   11.68%
 Nr.   7 :                    1      38   17.76%
-----------------------------------------------------------

Proceso MINERR
Opcion : 8 variables seleccionadas de 9
Variable en la columna final  DIC


--- CARACTERISTICAS SELECCIONADAS --- : 8
Nr.   1 =   6  --- Criterio = 0.45794  Nombre:  ANCHO
Nr.   2 =   7  --- Criterio = 0.35514  Nombre: INF-X
Nr.   3 =   2  --- Criterio = 0.33645  Nombre: SIA80
Nr.   4 =   3  --- Criterio = 0.32243  Nombre: TE628R
Nr.   5 =   0  --- Criterio = 0.28972  Nombre: PC718T
Nr.   6 =   8  --- Criterio = 0.28505  Nombre: INF-Y
Nr.   7 =   1  --- Criterio = 0.28505  Nombre: PC718D
Nr.   8 =   5  --- Criterio = 0.30374  Nombre: SCA80
```

```
-----------------------------------------------------------

        CLASES OBJETO :    4
      Nr.  de muestras:          214
      Nr. de caracteristicas:          9
                                    Nr. muestras
 Nr.   1 :                    4      80   37.38%
 Nr.   2 :                    3      44   20.56%
 Nr.   3 :                    5      27   12.62%
 Nr.   4 :                    1      63   29.44%
-----------------------------------------------------------

Proceso MINERR
Opcion : 8 variables seleccionadas de 9
Variable en la columna final  DIC
```


U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

```
--- CARACTERISTICAS SELECCIONADAS --- : 8
Nr.   1 =   5  --- Criterio = 0.35981  Nombre: SCA80
Nr.   2 =   3  --- Criterio = 0.26168  Nombre: TE628R
Nr.   3 =   6  --- Criterio = 0.24299  Nombre:  ANCHO
Nr.   4 =   7  --- Criterio = 0.23364  Nombre: INF-X
Nr.   5 =   8  --- Criterio = 0.23364  Nombre: INF-Y
Nr.   6 =   0  --- Criterio = 0.24299  Nombre: PC718T
Nr.   7 =   1  --- Criterio = 0.24299  Nombre: PC718D
Nr.   8 =   2  --- Criterio = 0.25701  Nombre: SIA80
```

```
-------------------------------------------------------------

        CLASES OBJETO :    3
      Nr.  de muestras:           214
      Nr. de caracteristicas:          9
                                    Nr. muestras
 Nr.   1 :                   3      79   36.92%
 Nr.   2 :                   2      72   33.64%
 Nr.   3 :                   1      63   29.44%
-------------------------------------------------------------

Proceso MINERR
Opcion : 8 variables seleccionadas de 9
Variable en la columna final  DIC


--- CARACTERISTICAS SELECCIONADAS --- : 8
Nr.   1 =   2  --- Criterio = 0.32710  Nombre: SIA80
Nr.   2 =   5  --- Criterio = 0.18224  Nombre: SCA80
Nr.   3 =   6  --- Criterio = 0.14953  Nombre:  ANCHO
Nr.   4 =   7  --- Criterio = 0.13551  Nombre: INF-X
Nr.   5 =   0  --- Criterio = 0.14019  Nombre: PC718T
Nr.   6 =   1  --- Criterio = 0.14019  Nombre: PC718D
Nr.   7 =   3  --- Criterio = 0.14486  Nombre: TE628R
Nr.   8 =   8  --- Criterio = 0.14486  Nombre: INF-Y
```

Dos vecinos

```
-------------------------------------------------------------

        CLASES OBJETO :    7
      Nr.  de muestras:           214
      Nr. de caracteristicas:          9
                                    Nr. muestras
 Nr.   1 :                   6      57   26.64%
 Nr.   2 :                   5      41   19.16%
 Nr.   3 :                   8       8    3.74%
 Nr.   4 :                   4      19    8.88%
 Nr.   5 :                   7      26   12.15%
 Nr.   6 :                   2      25   11.68%
 Nr.   7 :                   1      38   17.76%
-------------------------------------------------------------

Proceso MINERR
Opcion : 8 variables seleccionadas de 9
Variable en la columna final  DIC


--- CARACTERISTICAS SELECCIONADAS --- : 8
```


U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

```
Nr.   1 =   6  --- Criterio = 0.44860  Nombre:  ANCHO
Nr.   2 =   7  --- Criterio = 0.33645  Nombre: INF-X
Nr.   3 =   2  --- Criterio = 0.31776  Nombre: SIA80
Nr.   4 =   0  --- Criterio = 0.29907  Nombre: PC718T
Nr.   5 =   8  --- Criterio = 0.29439  Nombre: INF-Y
Nr.   6 =   1  --- Criterio = 0.29439  Nombre: PC718D
Nr.   7 =   3  --- Criterio = 0.32710  Nombre: TE628R
Nr.   8 =   5  --- Criterio = 0.33178  Nombre: SCA80
```

```
-----------------------------------------------------------

        CLASES OBJETO :    4
      Nr.  de muestras:          214
      Nr. de caracteristicas:          9
                                   Nr. muestras
 Nr.   1 :                    4      80   37.38%
 Nr.   2 :                    3      44   20.56%
 Nr.   3 :                    5      27   12.62%
 Nr.   4 :                    1      63   29.44%
-----------------------------------------------------------

Proceso MINERR
Opcion : 8 variables seleccionadas de 9
Variable en la columna final  DIC


--- CARACTERISTICAS SELECCIONADAS --- : 8
Nr.   1 =   5  --- Criterio = 0.34112  Nombre: SCA80
Nr.   2 =   3  --- Criterio = 0.26168  Nombre: TE628R
Nr.   3 =   0  --- Criterio = 0.23832  Nombre: PC718T
Nr.   4 =   1  --- Criterio = 0.23832  Nombre: PC718D
Nr.   5 =   8  --- Criterio = 0.23832  Nombre: INF-Y
Nr.   6 =   7  --- Criterio = 0.23832  Nombre: INF-X
Nr.   7 =   2  --- Criterio = 0.25234  Nombre: SIA80
Nr.   8 =   4  --- Criterio = 0.26168  Nombre: SMA80
```

```
-----------------------------------------------------------

        CLASES OBJETO :    3
      Nr.  de muestras:          214
      Nr. de caracteristicas:          9
                                   Nr. muestras
 Nr.   1 :                    3      79   36.92%
 Nr.   2 :                    2      72   33.64%
 Nr.   3 :                    1      63   29.44%
-----------------------------------------------------------

Proceso MINERR
Opcion : 8 variables seleccionadas de 9
Variable en la columna final  DIC


--- CARACTERISTICAS SELECCIONADAS --- : 8
Nr.   1 =   2  --- Criterio = 0.32710  Nombre: SIA80
Nr.   2 =   5  --- Criterio = 0.17290  Nombre: SCA80
Nr.   3 =   6  --- Criterio = 0.15421  Nombre:  ANCHO
Nr.   4 =   3  --- Criterio = 0.14953  Nombre: TE628R
Nr.   5 =   0  --- Criterio = 0.14953  Nombre: PC718T
Nr.   6 =   1  --- Criterio = 0.14953  Nombre: PC718D
Nr.   7 =   7  --- Criterio = 0.14953  Nombre: INF-X
```


U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

```
Nr.   8 =   8  --- Criterio = 0.14953  Nombre: INF-Y
```

Algoritmo Splines Regresivos Multivariables Adaptativos

Salida Espesor de recubrimiento Norte

```
Información generada por MARS versión 4.01

 Los parámetros son:
   n     p     nk       mi      df     il    fv    ic
  214   8   10   1   3.000000   0   0.000000   0
 Variables predictoras y flag
 var:       1  2  3  4  5  6  7  8
 flag:      1  1  1  1  1  1  1  1
Respuesta ordinal :
             min           n/4           n/2          3n/4           max
        0.100000      0.225714      0.477143      0.557143      0.900000

  forward stepwise knot placement:
 basfn(s)      gcv     #indbsfns    #efprms      variable      knot   parent

        0 0.029275 0.000000 1.000000
        2        1 0.012340 2.000000 5.000000 5.000000 0.798886 0.000000
        4        3 0.008006 4.000000 9.000000 2.000000 0.665903 0.000000
        6        5 0.006677 5.000000 12.000000 2.000000 0.177354 0.000000
        8        7 0.006503 7.000000 16.000000 4.000000 0.600000 0.000000
       10        9 0.006227 8.000000 19.000000 2.000000 0.741221 0.000000
 Model final despues de eliminacion backward stepwise :

 bsfn:          0         1         2         3         4         5
 coef:   -1.586182  2.196764  0.454447 -6.513486  3.584794  3.999422
 bsfn:          6         7         8         9        10
 coef:    0.000000  1.092595  0.102549  2.272878  0.000000
   (piecewise linear) gcv =  0.006227
   #efprms =  19.000000

 Descomposicion anova en 8  funciones basicas :
   fun.  std  dev.           -gcv       ¼bsfns        #efprms
variable(s)
    1     0.092846     0.010155     2          4.500000          5
    2     0.086547     0.012382     4          9.000000          2
    3     0.033785     0.006451     2          4.500000          4
 piecewise cubic fit en  8  funciones basicas, gcv  &lf
  -gcv removing each variable:
             1            2            3            4            5
6
      0.006227     0.012382     0.006227     0.006451     0.010155
      0.006227
             7            8
      0.006227     0.006227
 Inporancia relativa entre variables :
             1            2            3            4            5
6
      0.000000   100.000000     0.000000    19.085875    79.884956
      0.000000
             7            8
      0.000000     0.000000
 Graficas Mars (piecewise-cubic):
 Contribucion ordinal pura :

 crv  1 :  Variable ( 5)  max = 0.279803

 crv  2 :  Variable ( 2)  max = 0.394017

 crv  3 :  Variable ( 4)  max = 0.306326
```


U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

```
3  curvas  y  0 superficies
```

Salida Espesor de recubrimiento Centro

```
Información generada por MARS versión 4.01

 Los parametros son:
   n     p     nk       mi      df      il     fv     ic
  214  8  10  1  3.000000  0  0.000000  0
 Variables predictoras y flag
 var:      1  2  3  4  5  6  7  8
 flag:     1  1  1  1  1  1  1  1
Respuesta ordinal :
                min           n/4           n/2          3n/4           max
          0.100000     0.219403     0.577612     0.661194     0.900000

  forward stepwise knot placement:
 basfn(s)      gcv     #indbsfns   #efprms      variable     knot   parent

        0 0.052702 0.000000 1.000000
        2        1 0.016074 2.000000 5.000000 8.000000 0.871429 0.000000
        4        3 0.010315 3.000000 8.000000 8.000000 0.885714 0.000000
        6        5 0.007466 5.000000 12.000000 5.000000 0.748552 0.000000
        8        7 0.006127 7.000000 16.000000 3.000000 0.244000 0.000000
       10        9 0.005952 9.000000 20.000000 7.000000 0.369519 0.000000
 Model final despues de eliminacion backward stepwise :

 bsfn:          0        1        2        3        4        5
 coef:   0.563610  -26.862408  0.000000  26.905663  0.000000  2.066609
 bsfn:          6        7        8        9        10
 coef:   0.159630  0.000000  1.107663  -0.742373  0.000000
   (piecewise linear) gcv =  0.005640
   #efprms =  13.666668

 Descomposicion anova en 6  funciones basicas :
   fun.  std  dev.           -gcv       ¼bsfns        #efprms
variable(s)
    1     0.176412     0.015645     2         4.222222          8
    2     0.042627     0.007245     2         4.222222          5
    3     0.038257     0.006955     1         2.111111          3
    4     0.036723     0.006612     1         2.111111          7
 piecewise cubic fit en  6  funciones basicas, gcv  &lf
  -gcv removing each variable:
             1            2            3            4            5
6
      0.005640     0.005640     0.006955     0.005640     0.007245
      0.005640
             7            8
      0.006612     0.015645
 Inporancia relativa entre variables :
             1            2            3            4            5
6
      0.000000     0.000000     36.252060    0.000000     40.057438
      0.000000
             7            8
      31.172085    100.000000
 Graficas Mars (piecewise-cubic):
 Contribucion ordinal pura :

 crv  1 :  Variable ( 8)  max = 0.643181

 crv  2 :  Variable ( 5)  max = 0.260447

 crv  3 :  Variable ( 3)  max = 0.154486

 crv  4 :  Variable ( 7)  max = 0.409953
```


U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

```
4  curvas  y  0 superficies
```

Salida Espesor de recubrimiento Sur

```
Informacion generada por MARS version 4.01

 Los parametros son:
   n     p     nk       mi      df     il     fv     ic
  214   8   10   1  3.000000  0  0.000000  0
 Variables predictoras y flag
 var:       1  2  3  4  5  6  7  8
 flag:      1  1  1  1  1  1  1  1
Respuesta ordinal :
                 min           n/4           n/2          3n/4           max
           0.100000      0.529474      0.740000      0.798947      0.900000

  forward stepwise knot placement:
 basfn(s)      gcv     #indbsfns    #efprms       variable      knot   parent

        0 0.020554 0.000000 1.000000
        2        1 0.008224 2.000000 5.000000 5.000000 0.798886 0.000000
        4        3 0.005736 4.000000 9.000000 6.000000 0.357959 0.000000
        6        5 0.005084 6.000000 13.000000 3.000000 0.260000 0.000000
        8        7 0.004506 7.000000 16.000000 6.000000 0.638776 0.000000
       10        9 0.004438 8.000000 19.000000 6.000000 0.547347 0.000000
 Model final despues de eliminacion backward stepwise :

 bsfn:          0         1         2         3         4         5
 coef:    0.571735  2.947447  0.468071  -0.487298  -0.398149  0.000000
 bsfn:          6         7         8         9        10
 coef:    0.642901  2.610531  0.000000  -1.551016  0.000000
   (piecewise linear) gcv =  0.004370
   #efprms =  16.750000

 Descomposicion anova en 7  funciones basicas :
   fun.  std  dev.           -gcv       ¼bsfns        #efprms
variable(s)
    1     0.096231     0.010925     2          4.500000          5
    2     0.057910     0.007515     4          9.000000          6
    3     0.026187     0.004963     1          2.250000          3
 piecewise cubic fit en  7  funciones basicas, gcv  &lf
  -gcv removing each variable:
             1            2            3            4            5
6
      0.004370     0.004370     0.004963     0.004370     0.010925
      0.007515
             7            8
      0.004370     0.004370
 Inporancia relativa entre variables :
             1            2            3            4            5
6
      0.000000     0.000000    30.080780     0.000000   100.000000
      69.268471
             7            8
      0.000000     0.000000
 Graficas Mars (piecewise-cubic):
 Contribucion ordinal pura :

 crv  1 :  Variable ( 5)  max = 0.292828

 crv  2 :  Variable ( 6)  max = 0.256204

 crv  3 :  Variable ( 3)  max = 0.098339

3  curvas  y  0 superficies
```


U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Índice de Figuras

Figura 1. 1 - Sección de entrada de la línea de galvanizado 17
Figura 1. 2 - Esquema general de la sección de proceso. 22
Figura 1. 3 - Esquema general de la sección de salida y la línea de corte. 24
Figura 1. 4 - Vista general del pote de galvanizado, y de los distintos elementos necesarios para el control del recubrimiento. 26
Figura 1. 5 - Esquema de una cuchilla, en el que se puede apreciar la cuchilla de aire propiamente dicha, y sus sistemas auxiliares. 26
Figura 1. 6 - Detalle de las cuchillas de aire en funcionamiento sobre la banda ya galvanizada. 27
Figura 1. 7 - Corte esquemático de una cuchilla de aire. 28
Figura 1. 8 - Imagen de una cuchilla siendo transportada, mediante un puente grúa, hasta el pote de galvanizado. 28
Figura 1. 9 - Interior de una de las cuchillas. Pueden apreciarse los orificios por donde el aire pasa de las cámaras a la boquilla de salida. 29
Figura 1. 10 - Pantógrafo sin la cuchilla. 30
Figura 1. 11 - Pantógrafo de la cara Norte-Oeste, junto a su cuchilla. 30
Figura 1. 12 - Posibles ángulos de soplado de las cuchillas de aire. 31
Figura 1. 13 - Cotas de las cuchillas para galvanizado (unidades en cm.). 32
Figura 1. 14 – Cuchilla con los labios abiertos. Se puede apreciar los tornillos que permiten ajustar la forma de dichos labios. 37

Figura 2. 1 - División en regiones del flujo de material de recubrimiento. 46
Figura 2. 2 - Diferentes perfiles de velocidad fuera de la región de impacto. 52
Figura 2. 3 - Ejes principales y auxiliares. 55
Figura 2. 4 - Obtención del parámetro β 57
Figura 2. 5 – Esquema de la división en tres regiones de Szekely. 63
Figura 2. 6 - Tren de chapa gruesa. 74
Figura 2. 7 - Esquema de funcionamiento de una línea de hojalata electrolítica. 76

Figura 4. 1 – Esquema de la interfase zinc-aire 112
Figura 4. 2 – Dibujo esquemático de la frontera libre. 116
Figura 4. 3 – Errores de recubrimiento para la zona inferior de la banda (gr/m^2), para recubrimientos ° (52 gr/m^2). 123
Figura 4. 4 – Errores de recubrimiento para la zona inferior de la banda (gr/m^2), para recubrimientos (105 gr/m^2) 123
Figura 4. 5 – Errores de recubrimiento para la zona inferior de la banda (gr/m^2), para recubrimientos (145 gr/m^2) 124
Figura 4. 6 – Clasificación de 0 a 10 de las variables según su importancia para el algoritmo Univariante 128
Figura 4. 7 – Clasificación de 0 a 10 de las variables según su importancia para el algoritmo Covarianzas Múltiples. 129
Figura 4. 8 – Ejemplo de salida gráfica del Algoritmo 130
Figura 4. 9 – Clasificación de 0 a 10 de las variables según su importancia para el algoritmo Mínimo Error con un único vecino. 131
Figura 4. 10 – Clasificación de 0 a 10 de las variables según su importancia para el algoritmo Mínimo Error con dos vecinos. 131
Figura 4. 11 – Ejemplo de salida gráfica del algoritmo de Splines Regresivos Multivariables Adaptativos 132
Figura 4. 12 - Distinción de los grupos de la proyección Sammon (distancia euclídea) de las variables de proceso a excepción de las referentes a recubrimientos reales. 132
Figura 4. 13 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 1, recubrimiento EGC. 134
Figura 4. 14 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 1, recubrimiento EGC. 134
Figura 4. 15 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 1, recubrimiento EGB. 134

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Figura 4. 16 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 1, recubrimiento EGC. *135*
Figura 4. 17 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 1, recubrimiento EGA. *135*
Figura 4. 18 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 2, recubrimiento EGC. *136*
Figura 4. 19 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 2, recubrimiento EGC. *137*
Figura 4. 20 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 2, recubrimiento EGB. *137*
Figura 4. 21 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 2, recubrimiento EGB. *137*
Figura 4. 22 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 2, recubrimiento EGA. *138*
Figura 4. 23 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 3, recubrimiento EGC. *139*
Figura 4. 24 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 3, recubrimiento EGC. *139*
Figura 4. 25 - Perfil de recubrimiento para error negativo, grupo 4, recubrimiento EGC. *140*
Figura 4. 26 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 4, recubrimiento EGB. *140*
Figura 4. 27 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 4, recubrimiento EGA. *141*
Figura 4. 28 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 5, recubrimiento EGC. *142*
Figura 4. 29 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 5, recubrimiento EGC. *142*
Figura 4. 30 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 5, recubrimiento EGB. *142*
Figura 4. 31 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 6, recubrimiento EGC. *143*
Figura 4. 32 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 6, recubrimiento EGC. *143*
Figura 4. 33 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 7, recubrimiento EGC. *144*
Figura 4. 34 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 8, recubrimiento EGC. *145*
Figura 4. 35 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 8, recubrimiento EGC. *145*
Figura 4. 36 - Perfil de recubrimiento para error negativ, grupo83, recubrimiento EGA. *146*
Figura 4. 37 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo9, recubrimiento EGA. *147*
Figura 4. 38 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 11, recubrimiento EGC. *148*
Figura 4. 39 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 11, recubrimiento EGC. *148*
Figura 4. 40 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 12, recubrimiento EGC. *150*
Figura 4. 41 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 12, recubrimiento EGC. *150*
Figura 4. 42 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 12, recubrimiento EGA. *151*
Figura 4. 43 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 13, recubrimiento EGC. *152*
Figura 4. 44 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 13, recubrimiento EGC. *152*
Figura 4. 45 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 13, recubrimiento EGA. *153*
Figura 4. 46 – Proyección Sammon de los recubrimientos EGA. *154*
Figura 4. 47 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGA del grupo 1. ..... *155*
Figura 4. 48 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 1, recubrimiento EGA. *155*
Figura 4. 49 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGA del grupo 2. ..... *156*
Figura 4. 50 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 2, recubrimiento EGA. *156*
Figura 4. 51 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGA del grupo 3. ..... *157*
Figura 4. 52 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 3, recubrimiento EGA. *157*
Figura 4. 53 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGA del grupo 4. ..... *158*
Figura 4. 54 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 4, recubrimiento EGA. *158*
Figura 4. 55 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGA del grupo 5. ..... *159*
Figura 4. 56 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 5, recubrimiento EGA. *159*
Figura 4. 57 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGA del grupo 6. ..... *160*
Figura 4. 58 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 6, recubrimiento EGA. *160*
Figura 4. 59 – Proyección Sammon de los recubrimientos EGB. *161*
Figura 4. 60 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGB del grupo 1. ..... *162*
Figura 4. 61 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 1, recubrimiento EGB. *162*
Figura 4. 62 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 1, recubrimiento EGB. *162*
Figura 4. 63 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGB del grupo 2. ..... *163*

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Figura 4. 64 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 2, recubrimiento EGB. *163*
Figura 4. 65 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 2, recubrimiento EGB. *164*
Figura 4. 66 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGB del grupo 3. ..... *164*
Figura 4. 67 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 3, recubrimiento EGB. *165*
Figura 4. 68 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 3, recubrimiento EGB. *165*
Figura 4. 69 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGB del grupo 4. ..... *166*
Figura 4. 70 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 4, recubrimiento EGB. *166*
Figura 4. 71 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 4, recubrimiento EGB. *166*
Figura 4. 72 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGB del grupo 5. ..... *167*
Figura 4. 73 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 5, recubrimiento EGB. *167*
Figura 4. 74 – Proyección Sammon para los recubrimientos EGC. *168*
Figura 4. 75 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGC del grupo 1. ..... *169*
Figura 4. 76 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 1, recubrimiento EGC. *169*
Figura 4. 77 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 1, recubrimiento EGC. *169*
Figura 4. 78 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGC del grupo 2. ..... *170*
Figura 4. 79 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 2, recubrimiento EGC. *170*
Figura 4. 80 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 2, recubrimiento EGC. *171*
Figura 4. 81 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGC del grupo 3. ..... *171*
Figura 4. 82 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 3, recubrimiento EGC. *172*
Figura 4. 83 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 3, recubrimiento EGC. *172*
Figura 4. 84 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGC del grupo 5. ..... *173*
Figura 4. 85 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 5, recubrimiento EGC. *173*
Figura 4. 86 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 5, recubrimiento EGC. *173*
Figura 4. 87 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGC del grupo 6. ..... *174*
Figura 4. 88 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 6, recubrimiento EGC. *174*
Figura 4. 89 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 6, recubrimiento EGC. *174*
Figura 4. 90 – Distribución transversal del error en la banda para el recubrimiento EGC del grupo 7. ..... *175*
Figura 4. 91 - Perfil de recubrimiento para errores negativos, grupo 7, recubrimiento EGC. *175*
Figura 4. 92 - Perfil de recubrimiento para errores positivos, grupo 7, recubrimiento EGC. *176*
Figura 4. 93 – Dos mejores puntos EGA. *176*
Figura 4. 94 - Perfil de recubrimiento para mejor grupo EGA (en atención al mínimo error). *177*
Figura 4. 95 - Perfil de recubrimiento para mejor grupo EGA (en atención a la uniformidad). *177*
Figura 4. 96 – Dos mejores puntos EGB. *177*
Figura 4. 97 - Perfil de recubrimiento para mejor grupo EGB (en atención al mínimo error). *178*
Figura 4. 98 - Perfil de recubrimiento para mejor grupo EGA (en atención a la uniformidad). *178*
Figura 4. 99 – Dos mejores puntos EGC. *178*
Figura 4. 100 - Perfil de recubrimiento para mejor grupo EGC (en atención al mínimo error). *179*
Figura 4. 101 – Distribución espacial de los perfiles de banda para recubrimiento EGA. *179*
Figura 4. 102 – Distribución espacial de los perfiles de banda para recubrimiento EGB. *180*
Figura 4. 103 – Distribución espacial de los perfiles de banda para recubrimiento EGC. *180*
Figura 4. 104 - Distribución neuronal de la red seleccionada. *182*
Figura 4. 105 - Variación del error patrón Test/entrenamiento. *183*
Figura 4. 106 - Evolución del rendimiento de los distintos tipos de redes empleadas al aumentar los ciclos de entrenamiento. *184*
Figura 4. 107 - Evolución de los aciertos porcentuales de las redes entrenadas con respecto al numero de ciclos entrenados. *184*

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Índice de Tablas

Tabla 1. 1 - Vida en años de productos galvanizados.(Fuente: ACERALIA Corporación Siderúrgica *[CSI85]*). 13
Tabla 1. 2 - Características del Material de la Línea 14
Tabla 1. 3 - Características de las bobinas de entrada 15
Tabla 1. 4 - Características de las bobinas de salida. 15
Tabla 1. 5 - Características de las chapas de salida 15
Tabla 1. 6 - Velocidades de la línea en sus diferentes secciones. 16
Tabla 1. 7 - Características de las cuchillas de aire. 25
Tabla 1. 8 - Movimiento de los pantógrafos. 29

Tabla 4. 1 - Variables disponibles en la zona de proceso de galvanizado 122
Tabla 4. 2 Tipos de revestimientos medios empleados. 123
Tabla 4. 3 - Comportamiento estadístico de las variables presión cuchilla este (PC718T), velocidad de la línea (SIA80), temperatura del pote (TE628R), corriente en la brida (SMA80), tensión en el centro (SCA80). 125
Tabla 4. 4 - Recubrimiento inferior norte (DIN), recubrimiento inferior centro (DIC) recubrimiento inferior sur (DIS), ancho de la bobina (ANCHO), distancia cuchilla-banda en el eje X (INF-X), distancia cuchilla-banda en el eje Y (INF-Y) 125
Tabla 4. 5 - Rangos aceptables de variación para la presión en las cuchillas. 127
Tabla 4. 6 - Comportamiento estadístico de las variables presión cuchilla norte (PC718T), presión cuchilla sur (PC718D), velocidad de la línea (SIA80), temperatura del pote (TE628R), corriente en la brida (SMA80), tensión en el centro (SCA80) Recubrimiento superior norte (DSN), recubrimiento superior centro (DSC), recubrimiento superior sur (DSS), recubrimiento inferior norte (DIN), recubrimiento inferior centro (DIC) recubrimiento inferior sur (DIS), Ancho de la bobina (ANCHO), distancia cuchilla en eje X (INF-X), distancia cuchilla en eje Y (INF-Y). Datos filtrados. 127
Tabla 4. 7 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC, EGB, EGA (grupo1). 133
Tabla 4. 8 - Errores de recubrimiento negativos EGC. 133
Tabla 4. 9 - Errores de recubrimiento positivos EGC 134
Tabla 4. 10 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC. 134
Tabla 4. 11 - Errores de recubrimiento negativos EGB 134
Tabla 4. 12 - Errores de recubrimiento positivos EGB. 135
Tabla 4. 13 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGB. 135
Tabla 4. 14 - Errores de recubrimiento negativos EGA 135
Tabla 4. 15 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGA. 136
Tabla 4. 16 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC, EGB, EGA, (Grupo2). 136
Tabla 4. 17 - Errores de recubrimiento negativo EGC 136
Tabla 4. 18 - Errores de recubrimiento positivo EGC 136
Tabla 4. 19 - . Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC 137
Tabla 4. 20 - Errores de recubrimiento negativos EGB 137
Tabla 4. 21 - Errores de recubrimiento positivos EGB. 137
Tabla 4. 22 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGB. 137
Tabla 4. 23 - Errores de recubrimiento EGA 138
Tabla 4. 24 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGA. 138
Tabla 4. 25 - Errores de recubrimiento negativos EGC. 138

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Tabla 4. 26 - Errores de recubrimiento positivos EGC 139
Tabla 4. 27 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC 139
Tabla 4. 28 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC, EGB, EGA (Grupo4) 139
Tabla 4. 29 - Errores de recubrimiento EGC 140
Tabla 4. 30 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC. 140
Tabla 4. 31 - Errores de recubrimiento EGB. 140
Tabla 4. 32 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGB. 140
Tabla 4. 33 - Errores de recubrimiento EGA. 141
Tabla 4. 34 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGA. 141
Tabla 4. 35 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC, EGB (Grupo5) 141
Tabla 4. 36 - Errores de recubrimiento negativos EGC. 141
Tabla 4. 37 - Errores de recubrimiento positivos EGC 142
Tabla 4. 38 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC. 142
Tabla 4. 39 - . Errores de recubrimiento negativos EGB 142
Tabla 4. 40 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGB 143
Tabla 4. 41 - Errores de recubrimiento negativos EGC 143
Tabla 4. 42 - . Errores de recubrimiento positivos EGC 143
Tabla 4. 43 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC 143
Tabla 4. 44 - Errores de recubrimiento negativo EGC 144
Tabla 4. 45 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC 144
Tabla 4. 46 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC, EGA (Grupo8) 144
Tabla 4. 47 - Errores de recubrimiento negativo EGC 145
Tabla 4. 48 - Errores de recubrimiento positivo EGC 145
Tabla 4. 49 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC. 145
Tabla 4. 50 - Errores de recubrimiento EGA. 145
Tabla 4. 51 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGA. 146
Tabla 4. 52 - . Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGA (grupo 9). 146
Tabla 4. 53 - . Errores de recubrimiento negativos EGA 146
Tabla 4. 54 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC (grupo10). 147
Tabla 4. 55 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC (grupo11). 147
Tabla 4. 56 - Errores de recubrimiento negativos EGC 148
Tabla 4. 57 - Errores de recubrimiento positivos EGC 148
Tabla 4. 58 - Errores de recubrimiento EGA. 149
Tabla 4. 59 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGA. 149
Tabla 4. 60 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC (grupo12). 149
Tabla 4. 61 - Errores de recubrimiento negativos EGC 150
Tabla 4. 62 - Errores de recubrimiento positivos EGC 150
Tabla 4. 63 - Errores de recubrimiento EGA 151

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Tabla 4. 64 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGA. 151
Tabla 4. 65 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC, EGA (grupo13). 151
Tabla 4. 66 - Errores de recubrimiento negativos EGC 152
Tabla 4. 67 - Errores de recubrimiento positivos EGC 152
Tabla 4. 68 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC. 152
Tabla 4. 69 - Errores de recubrimiento EGA 153
Tabla 4. 70 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGA. 153
Tabla 4. 71 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGA (grupo1). 154
Tabla 4. 72 - Errores de recubrimiento negativos EGA 155
Tabla 4. 73 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGA (grupo2). 155
Tabla 4. 74 - Errores de recubrimiento negativos EGA 156
Tabla 4. 75 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGA (grupo3). 157
Tabla 4. 76 - Errores de recubrimiento negativos EGA 157
Tabla 4. 77 - Comportamiento estadístico de las variablesque influyen en el proceso de recubrimiento EGA (grupo4) 158
Tabla 4. 78 - Errores de recubrimiento negativos EGA 158
Tabla 4. 79 - Comportamiento estadístico de las variablesque influyen en el proceso de recubrimiento EGA (grupo5). 159
Tabla 4. 80 - Errores de recubrimiento negativos EGA 159
Tabla 4. 81 - Comportamiento estadístico de las variablesque influyen en el proceso de recubrimiento EGA (grupo5). 160
Tabla 4. 82 - Errores de recubrimiento negativos EGA 160
Tabla 4. 83 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGB 161
Tabla 4. 84 - Errores de recubrimiento negativos EGB 162
Tabla 4. 85 - Errores de recubrimiento positivos EGB 162
Tabla 4. 86 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC, EGB, EGA, (Grupo2). 163
Tabla 4. 87 - Errores de recubrimiento negativo EGB 163
Tabla 4. 88 - Errores de recubrimiento positivo EGB 164
Tabla 4. 89 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGB 164
Tabla 4. 90 - Errores de recubrimiento negativos EGB 165
Tabla 4. 91 - Errores de recubrimiento positivos EGB 165
Tabla 4. 92 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGB. 165
Tabla 4. 93 - Errores de recubrimiento negativos EGB 166
Tabla 4. 94 - Errores de recubrimiento positivos EGB 166
Tabla 4. 95 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGB 167
Tabla 4. 96 - Errores de recubrimiento negativos EGB 167
Tabla 4. 97 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC 168
Tabla 4. 98 - Errores de recubrimiento negativos EGC. 169
Tabla 4. 99 - Errores de recubrimiento positivos EGC 169
Tabla 4. 100 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC. 170
Tabla 4. 101 - Errores de recubrimiento negativo EGC 170
Tabla 4. 102 - Errores de recubrimiento positivo EGC 170

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

Tabla 4. 103 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC *171*
Tabla 4. 104 - Errores de recubrimiento negativos EGC. *171*
Tabla 4. 105 - Errores de recubrimiento positivos EGC *172*
Tabla 4. 106 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC *172*
Tabla 4. 107 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC *172*
Tabla 4. 108 - Errores de recubrimiento negativos EGC *173*
Tabla 4. 109 - Errores de recubrimiento positivos EGC *173*
Tabla 4. 110 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC *174*
Tabla 4. 111 - Errores de recubrimiento negativos EGC *174*
Tabla 4. 112 - Errores de recubrimiento positivos EGC *174*
Tabla 4. 113 - Comportamiento estadístico de las variables que influyen en el proceso de recubrimiento EGC *175*
Tabla 4. 114 - Errores de recubrimiento negativos EGC *175*
Tabla 4. 115 - Errores de recubrimiento positivos EGC *176*
Tabla 4. 116 - Rendimiento de la red salida INF-X. *181*
Tabla 4. 117 - Rendimiento de la red Salida INF-Y. *181*
Tabla 4. 118 - Aciertos porcentuales de los distintos patrones para las diferentes redes entrenadas salida INF-X. *181*
Tabla 4. 119 - Aciertos porcentuales de los distintos patrones para las diferentes redes entrenadas salida INF-Y. *182*

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.

U. de Oviedo. Biblioteca Universitaria.