

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica,
de Computadores y Sistemas

Programa

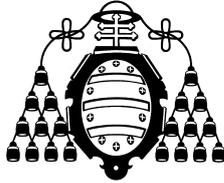
Control de procesos, electrónica industrial e ingeniería eléctrica

TESIS DOCTORAL

**Modelado de Procesos Industriales Complejos
a través de Minería de Datos. Aplicación a un
Tren de Laminación en Frío**

D. Daniel González Ordóñez

Diciembre 2011



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica,
de Computadores y Sistemas

Programa

Control de procesos, electrónica industrial e ingeniería eléctrica

TESIS

**MODELADO DE PROCESOS INDUSTRIALES
COMPLEJOS A TRAVÉS DE MINERÍA DE DATOS.
APLICACIÓN A UN TREN DE LAMINACIÓN EN
FRÍO**

Memoria presentada para la obtención del grado de
Doctor por la Universidad de Oviedo

Autor: D. Daniel González Ordóñez

Director: D. Abel Alberto Cuadrado Vega

Gijón, Diciembre 2011



RESUMEN (en Inglés)

Modern manufacturing processes are performed by a set of different physical mechanisms with different nature. Many of these have been used for decades although today not all the aspects of these processes are completely understood. The application of these production processes presents some drawbacks that are considered traditional problems of this kind of processes. The lack of knowledge on these aspects comes from the limited modeling techniques for industrial processes.

The traditional modeling process through analytical equations is constricted by the complexity of the defining equations. Anyway there are some other approaches to deal with modeling tasks. It is very common to find data acquisition systems at any industrial facility, which allows the development of data-based models. Moreover and thanks to the adoption of a visual approach, not only the analysis will be done in an easy way but the integration of new knowledge into the facility will be improved. This work is based on SOM (*Self-organizing maps*), using it as the main tool in the modeling tasks, to take advantage of its well-known visual characteristics in almost any stage.

As a practical application, a traditional vibration problem in the cold rolling process of steel, which is called *chatter*, has been studied. Through the analysis of huge groups of data collected from real facilities, the phenomenon has been described and differentiated from others similar vibrational incidents. Then and through a simple model, *chatter* has been simulated in different real working points, letting us to study the stability of the vibrational mechanism and its relationship with some important factors of the rolling process. Last, adopting a dynamical point of view based on SOM, it has been possible to analyze the evolution of different *chatter* characteristics on its own formation process, pointing out some factors which resulted as clear indicators of the phenomenon

SR/A. DIRECTOR/A DE DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA. ELECTRONICA DE COMPUTADORES Y SISTEMAS/

SR/A. PRESIDENTE/A DE LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA DE DOCTORADO EN Control de procesos, electrónica industrial e ingeniería eléctrica. (Mención de Calidad)

Todo cuanto sé lo sé porque
amo.

Tolstói

Agradecimientos

Cuando empecé la solitaria labor de realizar una tesis nadie me avisó de la gran cantidad de personas que me encontraría por el camino. De todas ellas mi mayor agradecimiento es para Abel, mi director de tesis, por su inestimable colaboración y apoyo. Él me enseñó con su ejemplo lo que significa ser un buen profesional de la investigación además de concederme la oportunidad de desarrollar este trabajo. Pero por encima de todo él siempre estuvo ahí y se preocupó por mi.

No puedo olvidar tampoco a Faustino en estas líneas. De alguna manera siempre ha estado presente en toda mi carrera profesional, representando todo aquello con lo que sueño convertirme algún día.

Importantes también han sido dos grandes grupos humanos: el equipo de profesores del ISA y el personal de ArcelorMittal con el que he tenido trato. Los unos me convirtieron en Ingeniero mientras que con los otros aprendí un poco más sobre la profesión.

Siempre recordaré con inmenso cariño a ese magnífico conjunto de personas que son, o han sido, becarios de este departamento. Desde los primeros: Cordero, Manu, Campo, Eva ... a mis últimos compañeros de laboratorio: Pérez, Fran y Mario; sin olvidarme eso sí, de mi grupo preferido de Ingenieros Informáticos: Lucas, Bene, Victor, Noé, Jose, ... A todas esas personas que me conocieron alguna vez mientras “hacía mi tesis” quiero darles las gracias y sólo decirles que por fin ya terminé.

Mi familia ha sido sin duda el apoyo más valioso en este tiempo, en especial mi madre y mi padre. Si no fuera por su cariño e inquebrantable fe en mi nada se hubiera logrado. Esta tesis es tan mía como vuestra, no lo olvidéis, sólo espero no defraudaros.

Por último pero primera está María, siempre un apoyo incondicional, mu-

chas otras veces una musa y sin duda el sentido de todo. Sé que comprendes mejor que nadie lo que significa escribir una tesis y por ello siempre supiste infundirme valor cuando más lo necesité. Gracias.

*A mis padres,
a mi hermana,
a mi novia,
a mis amigos,
ellos lo son todo.*

Resumen

Los procesos de fabricación modernos se llevan a cabo mediante una serie de mecanismos físicos de distinta naturaleza. Muchos de éstos han sido utilizados durante décadas y sin embargo aún hoy no todos los aspectos de estos procesos son enteramente comprendidos. La aplicación de estos mecanismos de fabricación presenta inconvenientes que son considerados, muchas veces, males tradicionales del proceso. La falta de conocimiento en estos aspectos deriva, sobre todo, de la limitación a la hora de modelar el proceso industrial de manera eficaz.

El modelado tradicional, mediante ecuaciones analíticas, está limitado muchas veces por el grado de complejidad alcanzado. Sin embargo existen otros enfoques para abordar el problema del modelado. La existencia, hoy día, de sistemas de adquisición permite el modelado a través de técnicas basadas en datos, en principio más fáciles de utilizar. Con la adopción de un enfoque visual no sólo se llevará a cabo el análisis de manera más cómoda, sino que se podrá aumentar el grado de integración del nuevo conocimiento en la realidad industrial estudiada. Este trabajo empleará el SOM (*Self-organizing maps*) como elemento base de modelado, tratando de explotar en todas las fases sus reconocidas propiedades visuales.

Como aplicación práctica se estudió un problema tradicional de vibraciones en el proceso de laminación en frío del acero, el *chatter*. Mediante datos tomados de una factoría real se trató de caracterizar el fenómeno y así diferenciarlo de episodios vibratorios similares. A continuación y a través de un modelo simple, se simuló el *chatter* bajo puntos de funcionamiento reales llevando a cabo un estudio de la estabilidad del mecanismo vibratorio y de varios factores que intervienen en él. Finalmente y bajo un enfoque dinámico basado en SOM, fue posible un análisis de la evolución de diferentes características del *chatter* en su proceso mismo de formación, apuntando a ciertos factores como indicadores fiables de la aparición del fenómeno.

Índice general

1. Introducción y objetivos	1
1.1. Introducción	1
1.2. Necesidades y objetivos	3
1.2.1. Objetivos	5
1.3. Definición del problema	6
1.4. Metodología de trabajo	8
1.4.1. Datos e hipótesis de partida	10
1.5. Estructura del trabajo	10
2. La planta	13
2.1. La transformación de productos en frío	13
2.2. El tren tándem	14
2.2.1. Partes funcionales	14
2.2.2. La caja de laminación	15
2.2.3. Sensores y sistemas de control	18
2.3. Sistema <i>softdetect</i>	23
2.3.1. Estructura del sistema	24
3. Laminación en frío	31
3.1. Modelado de trenes de laminación en frío	31
3.1.1. Introducción	31
3.1.2. Modelos estáticos	34
3.1.3. Modelos de carácter dinámico	52
3.2. Laminación en frío y vibraciones	55
3.2.1. Vibraciones forzadas a baja frecuencia	57
3.2.2. Vibración torsional	57
3.2.3. Modo de quinta octava	58
3.2.4. Modo de tercera octava	60
3.2.5. Criterios de velocidad crítica	63
3.2.6. Estrategias de eliminación del <i>chatter</i>	65

4. Modelado y supervisión	69
4.1. Los sistemas de supervisión	69
4.2. Técnicas de modelado cuantitativas	72
4.2.1. PCA, análisis de componentes principales	72
4.2.2. Clasificadores estadísticos	74
4.2.3. Redes neuronales	74
4.2.4. SOM, mapas topológicos auto-organizados	75
4.3. El cálculo del residuo y su representación	84
4.3.1. El residuo basado en PCA y en SOM	85
4.3.2. Estrategias para el cálculo e interpretación de residuos SOM	90
5. El fenómeno del <i>chatter</i>	97
5.1. El <i>chatter</i> de tercera octava	97
5.1.1. Definición del <i>chatter</i> en este estudio	98
5.1.2. Observaciones realizadas	112
6. Un modelo simple para el <i>chatter</i>	123
6.1. El ciclo de autoexcitación del <i>chatter</i>	123
6.1.1. Introducción	123
6.1.2. El proceso de laminado	124
6.1.3. La caja de laminación	126
6.1.4. El modelo del ciclo de autoexcitación	128
6.2. Estabilidad en la laminación	130
6.2.1. Influencia de los diferentes aspectos de laminación so- bre la estabilidad del sistema	133
7. La caracterización del <i>chatter</i>	151
7.1. Introducción	151
7.2. El modelo con datos	151
7.3. Proceso de identificación	153
7.3.1. La identificación de parámetros	153
7.3.2. Resultados obtenidos	155
7.4. Mapas de dinámica	161
7.4.1. Los mapas de dinámica	161
7.4.2. Mapas de dinámica aplicados al fenómeno del <i>chatter</i> .	163
7.4.3. Aplicación del conocimiento adquirido	167
8. Resumen y discusión final	175
8.1. Conclusiones	175
8.1.1. El modelado basado en datos	175

ÍNDICE GENERAL

XIII

8.1.2. El <i>chatter</i> en el proceso de laminación en frío	177
8.2. Aportaciones	178
8.3. Líneas futuras	180
A. Lista de variables	183

Índice de figuras

1.1. Esquemas de las etapas seguidas en este trabajo.	9
2.1. Producto en frío.	13
2.2. Procesos en frío [96].	14
2.3. Tren tándem.	14
2.4. Esquema con la disposición de las partes esenciales del tren tándem[29].	15
2.5. Diferentes configuraciones para una caja de laminación.	16
2.6. Esquema de las partes fundamentales de una caja de laminación.	17
2.7. Estrategias control de tensión.	20
2.8. Galga de rayos X para la medición del error de espesor.	21
2.9. Estructura de control del tren	23
2.10. Armario con PC de adquisición y el cableado de las señales de campo.	25
2.11. Ventana principal de la aplicación de adquisición con ventanas secundarios.	26
2.12. Ventana aplicación de análisis con un mapa de distancias.	27
2.13. Ventana del gestor de modelos con mapas.	28
2.14. Monitorización del tren con un modelo SOM	29
3.1. Laminación.	31
3.2. Instalaciones de un tren de laminación moderno.	32
3.3. Área de mordida en el proceso de laminación en frío [55].	34
3.4. Compresión no homogénea y homogénea.	35
3.5. Distribución de presiones según Von Karman del tipo <i>friction-hill</i>	36
3.6. Diagrama de fuerzas durante el proceso de laminación.	37
3.7. Geometría considerada teniendo en cuenta la deformación del rodillo en el modelo de Smith.	39
3.8. Curvas de Trinks para la resolución gráfica del modelo basado en Von Karman. [87]	40

3.9. Distribución de presiones según Tselikov.	41
3.10. Distribución de presiones según Nadai (caso τ cte.).	42
3.11. Distribución de presiones según Nadai (caso hidrodinámico).	43
3.12. Asunciones del modelo de Orowan.	45
3.13. Zonas de deformación elástico-plásticas según Jortner.[87]	48
3.14. Gráficas del método de Davies.	50
3.15. Distribución de presiones constante según Roberts y las 3 lon- gitudes efectivas.[87].	51
3.16. Efectos sobre el equilibrio de laminación.	53
3.17. Oscilación del puente de <i>Tacoma Narrows</i> producto de un mo- vimiento autoexcitado.	56
3.18. Marcas sobre rodillo de apoyo consecuencia de vibración en quinta octava [4].	58
3.19. Ligeros defectos en ampuestas de rodillos producto del manejo del mismo y probable desencadenante de vibración en quinta octava.[26]	59
3.20. Aspecto de marcas sobre la banda debido a vibraciones en tercera octava.[114]	61
3.21. Desfases encontrados entre las diversas señales fundamentales de fuerza, tensión y espesor.	62
3.22. Diagrama de bloques de un sistema detector de <i>chatter</i> típico.	66
4.1. Bloques funcionales de un sistema FDI.	70
4.2. Clasificación de métodos basados en datos[99].	71
4.3. Superficie de vectores de codificación (malla azul) sobre con- junto de datos en disposición esférica (nube de puntos negra).	77
4.4. Evolución del entrenamiento de un SOM.	79
4.5. Proyección del espacio de entrada sobre el de visualización.	80
4.6. Mapas de características.	82
4.7. Mapas de distancias con la trayectoria de la evolución de unos datos de entrada y etiquetas en los estados detectados.	83
4.8. Modelos generados mediante PCA (a) y SOM (b). Las carac- terísticas de linealidad son patentes.	86
4.9. Proyección sobre el subespacio definido por PCA.	87
4.10. Representación de un residuo en PCA, <i>contribution plots</i>	88
4.11. Mapa de residuos de un modelo de 5 características generado por SOM.	89
4.12. Planos de componentes del modelo entrenado, la última gráfica corresponde al mapa de distancias.	92
4.13. Representación visual de residuos.	93
4.14. Planos de componentes ejemplo detección de fallos.	95

4.15. Gráfico de residuos con los 3 grupos de bobinas de diferente calidad.	96
5.1. Espectrograma de la vibración junto al perfil de velocidad. . .	98
5.2. Histograma con la distribución de frecuencias de aparición de <i>chatter</i>	99
5.3. Evolución de las vibraciones de la caja 4 (en bruto y filtrado para la banda de <i>chatter</i>) y de la velocidad de laminación. . .	100
5.4. Formación del <i>chatter</i>	100
5.5. Espectrograma de la señal de vibración de la caja 4. Nótese los 3 episodio de <i>chatter</i> en torno a 150 Hz.	101
5.6. Ciclo de autoexcitación.	102
5.7. Comportamiento dinámico del conjunto caja-material ante variaciones en el tiro.	104
5.8. Velocidad de laminación ante el fenómeno del <i>chatter</i>	105
5.9. Fuerza, vibración, tiro y error de espesor ante el <i>chatter</i>	108
5.10. Modos de vibración de la caja de laminación. Observese el número 2 <i>chatter</i> y el 4 <i>faceting</i>	109
5.11. Marcas periódicas sobre cilindros de trabajo que ocasionaron una frecuencia en la banda del <i>chatter</i>	110
5.12. Los efectos del <i>chatter</i> sobre la calidad del producto final son fácilmente apreciables.	111
5.13. Efecto del <i>chatter</i> sobre la velocidad media de laminación en un periodo de trabajo de 4 horas con 21 bobinas procesadas. .	112
5.14. Algoritmo de identificación y caracterización del <i>chatter</i>	113
5.15. El concepto de velocidad frontera para el origen del <i>chatter</i> no se puede aplicar directamente sobre los datos reales del estudio.	114
5.16. Espectrograma de la fuerza de laminación en un episodio de <i>chatter</i>	115
5.17. Espectrograma del error de espesor en un episodio de <i>chatter</i> . .	116
5.18. Aspecto de la señal de tensión capturada a 2 kHz.	116
5.19. Evolución temporal de la vibración en todas las cajas de laminación.	118
5.20. Esquema de interacción entre cajas.	119
5.21. Representación simultánea de los episodios de <i>chatter</i>	120
5.22. Ejemplos ilustrativos del fenómeno <i>chatter</i>	121
5.23. Espectrograma de la vibración de varias bobinas seguidas. . .	122
6.1. Comparativa para tres puntos de funcionamiento distinto de la fuerza calculada a través de los métodos anteriores con la real.	126

6.2. Modelo simplificado de una caja cuarta (a) y el utilizado para el estudio de la vibración de tercera octava (b).	127
6.3. Modelo de formación del <i>chatter</i>	129
6.4. Respuesta frecuencial (a) y temporal (b) del modelo.	130
6.5. Comparación de un caso real con el modelo de <i>chatter</i>	132
6.6. Mecanismo de cálculo para variables propias del laminador. . .	136
6.7. Estudio de la estabilidad y los parámetros del laminador (I). .	137
6.8. Estudio de la estabilidad y los parámetros del laminador (II). .	138
6.9. Estudio de la estabilidad y los parámetros del laminador (III). .	139
6.10. Evolución de los polos ante variaciones del parámetro V_s	140
6.11. Resultado de la aplicación del criterio de velocidad crítica sobre 22 bobinas.	141
6.12. Mecanismo de cálculo para variables propias del proceso de laminación.	143
6.13. Influencia de las tensiones (entrada/salida) sobre la estabilidad del sistema.	144
6.14. Influencia del ancho de la banda sobre la estabilidad del sistema. .	145
6.15. Influencia del coeficiente de rozamiento μ sobre la estabilidad del sistema (izda.). Resultado de un valor extremo superior del valor de μ (dcha.).	146
6.16. Influencia de la dureza del material sobre la estabilidad del sistema.	147
6.17. Influencia de la fuerza sobre los parámetros K_t y K_s	148
6.18. Relación entre la fuerza de laminación y el resto de variables, entre ellas los parámetros K_t y K_s	148
7.1. Estructura del modelo con datos reales.	153
7.2. Esquema del modelo ARMAX utilizado para la identificación. . . .	154
7.3. Evolución de las variables de entrada y salida utilizados para la estimación.	157
7.4. Comparación entre el término de salida (y_k) utilizado en la estimación (espesor de salida, h_s) y el error de la misma (e). . .	158
7.5. Evolución de la estimación de los coeficientes de las funciones de transferencia en z	159
7.6. Evolución de la estimación de los parámetros físicos de las funciones de transferencia en el plano continuo.	160
7.7. Disposición de los polos en el plano discreto (z) del denominador común de (7.1).	162
7.8. Planos de componentes del modelo SOM entrenado con los parámetros identificados.	165
7.9. Mapas dinámicos.	166

7.10. Evolución de los polos en un episodio de *chatter*. 168

7.11. Modelo SOM para identificación del *chatter*. 169

7.12. Identificación de la condición de *chatter*. 170

7.13. Comprobación modelo. 172

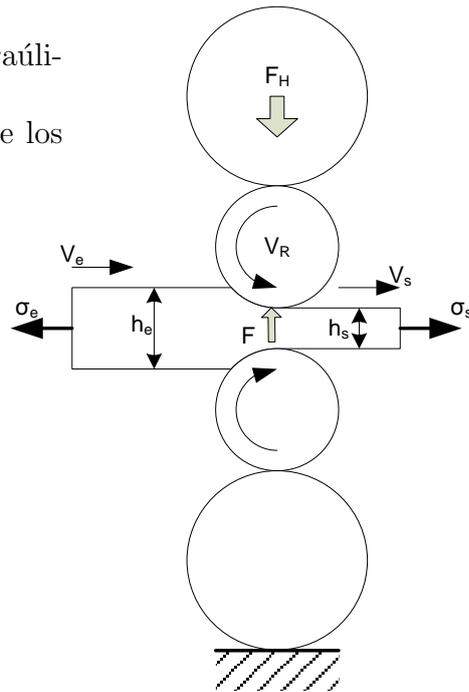
7.14. Identificación del *chatter* sobre una bobina a través del modelo
SOM. 173

Índice de tablas

6.1. División de parámetros en estudio.	134
6.2. Comparación entre velocidad de laminación y la crítica según criterio	140
6.3. Tabla resumen con la evolución de la estabilidad según paráme- tros fundamentales de la laminación.	149

Nomenclatura

V_e	Velocidad de entrada
V_s	Velocidad de salida
V_R	Velocidad periférica del rodillo de trabajo
h_0	Espesor inicial a la entrada del tren
h_e	Espesor de entrada
h_s	Espesor de salida
F_H	Fuerza ejercida por el sistema hidráulico sobre el rodillo de apoyo
F	Fuerza ejercida por la banda sobre los rodillos de trabajo
σ_e	Tensión de entrada
σ_s	Tensión de salida
T	Par de laminación
w	Ancho bobina
μ	Coefficiente de rozamiento
f	Deslizamiento $\left(\frac{V_s - V_R}{V_R}\right)$
r	Reducción $\left(\frac{h_e - h_s}{h_e}\right)$
M	Masa por rodillo trabajo/apoyo
B_m	Amortiguamiento de la caja
K_m	Rigidez de la caja
E	Módulo elástico del acero
L	Distancia entre cajas
K_t	$\frac{\partial F}{\partial \sigma_e}$
K_s	$\frac{\partial F}{\partial h_s}$
K_e	$\frac{\partial F}{\partial h_e}$
S_i	Límite elástico de la banda en la caja i
R	Radio del cilindro
R_m	Radio modificado del cilindro



Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1. Introducción

El *conocimiento* es el recurso más valioso de cualquier actividad humana. A fin de lograr un desarrollo sostenible basado en la calidad e innovación, todo este conocimiento ha de ser utilizado de manera eficaz. Sin embargo el *know-how* de una organización no siempre es evidente y mucho menos aún, fácil de sintetizar. Éste aparece disgregado, oculto, muchas veces imposible de reconocer, siendo necesario una etapa de reflexión y síntesis que permita obtener el máximo rendimiento del mismo.

Aunque, dentro de la estructura empresarial, se han desarrollado muchas iniciativas orientadas a la identificación y aprovechamiento del conocimiento difuso, es siempre un problema la extracción desde procesos industriales complejos y altamente tecnificados.

Muchos de los actuales procesos industriales han venido utilizándose durante décadas, mejorando con el tiempo en eficiencia, calidad y seguridad. Sin embargo y a pesar del progreso, la industria choca contra las mismas limitaciones una vez alcanzado un determinado grado de mejora.

La industria moderna se caracteriza por su alta complejidad y el elevado grado de tecnología utilizado. Las estructuras de control actuales tienen en cuenta cada vez más aspectos del proceso, elevando de manera exponencial el número de variables en juego. Quizás la interacción sea una de las claves de los mecanismos de producción modernos. Hoy día es necesario la aportación de múltiples subsistemas auxiliares para la obtención de un producto de calidad. Por último, una de las características del mercado es la

constante aparición de productos con mejores características y ciclos de vida más cortos, demandando un gran esfuerzo a las organizaciones empresariales.

El moderno sector del acero es un buen ejemplo. Habiéndose fundado hace más de un siglo, ha sabido adaptarse al cambio tecnológico convirtiéndose en un sector competitivo capaz de dar respuesta a los requerimientos, cada vez más estrictos, del mercado actual. En las últimas décadas los procesos de laminación han evolucionado de manera constante, aumentando la cantidad de sistemas auxiliares y aspectos a controlar. Geometría de los rodillos, homogeneidad de la deformación, condiciones de lubricación, ... son elementos incluidos en la actualidad en los modelos de control. La adopción de estos nuevos sistemas de regulación así como otros de detección y comunicación han permitido alcanzar nuevos objetivos de calidad.

Un proceso industrial, como el que este trabajo aborda, se caracteriza por el elevado número y heterogeneidad de variables que maneja. Este enorme volumen de datos desborda la capacidad humana de análisis, siendo necesario dar un paso más allá para lograr un mejor tratamiento de la información y una eficiente extracción del conocimiento de los datos disponibles. Gracias al desarrollo, en los últimos años, de las técnicas de minería de datos (*data mining*), es ahora posible sintetizar valioso conocimiento técnico oculto en los procesos industriales complejos. La minería de datos es un procedimiento que trata de facilitar la comprensión de los conjuntos de datos, permitiendo entender de mejor manera el proceso subyacente. Este procedimiento engloba un amplio rango de técnicas, desde la estadística avanzada a las redes neuronales, pasando por los árboles de decisión y variados algoritmos de *clustering* (o agrupamiento). El proceso de *data mining* permite extraer conocimiento cualitativo e incluso cuantitativo de un proceso generalmente complejo, multivariable, del que se desconocen muchas interacciones [43].

Pero un proceso de *data mining* es arduo y trabajoso. Es necesario conseguir sistemas útiles, capaces de llevar a cabo estas actividades de manera rápida y eficaz. El enfoque visual, es decir, tratar de aprovechar las capacidades visuales humanas en las labores de análisis de datos, es una de las direcciones en las que más esfuerzo se está invirtiendo [53][32][60]. Además, las técnicas visuales presentan una capacidad de integración muy grande con otras fuentes de conocimiento existentes, por ejemplo el valioso conocimiento experto de los encargados de planta, permitiendo la extracción de nuevas conclusiones desde conjuntos de datos vagos e imprecisos. También la flexibilidad de estas técnicas hace posible su integración con modelos analíticos, incluso con aquellos parciales o incompletos, permitiendo una comprobación

rápida de los mismos e incluso una mejor definición.

Este trabajo trata de abordar el problema del análisis de un proceso tan complejo como es el de la laminación en frío, a través de un enfoque basado en datos, mediante herramientas netamente visuales. El trabajo intenta demostrar que a través de una combinación de técnicas de extracción de conocimiento, no solo es posible llegar a valiosas conclusiones, sino incluso a la aplicación directa de este nuevo conocimiento. Todo ello en un entorno tan complejo como es el del moderno sector del acero.

1.2. Necesidades y objetivos

En los últimos años, los protagonistas a nivel europeo de la industria del acero, acuerdan el desarrollo del sector sobre una base de innovación y calidad. Recogido en la Agenda Estratégica de Investigación [1], de la Plataforma Tecnológica Española del Acero (PLATEA), aparece la intención de apostar por la *“fabricación inteligente”* a través de un *“control total del proceso”* que incluya aspectos como la *“modelización completa e integral de las líneas de producción”* y la *“gestión del conocimiento inteligente”*. Todos estos intereses han cristalizado en el desarrollo de ambiciosos estudios y proyectos de investigación en áreas tales como, el modelado basado en datos de procesos industriales [19], la creación de sistemas inteligentes para la optimización de recursos [17] o el desarrollo de sistemas de mantenimiento predictivo [16].

Las necesidades de la industria vienen dictadas por las condiciones del mercado en el que se encuentre, en este caso el sector del acero. Las aplicaciones finales del acero laminado son cada vez más amplias. Además, como material económicamente competitivo y fácil de trabajar, cada día aumenta su demanda. Sin embargo este mercado no solo crece de manera cuantitativa, sino que los consumidores demandan periódicamente la mejora de las características del material producido. En este sentido el aumento de la calidad general del producto sólo es posible a través de un control exhaustivo del proceso.

En un proceso de producción intensivo como el de laminación, suele existir un determinado número de rechazos sobre los que no se tiene certeza absoluta de sus causas. El acabado superficial e incluso los requerimientos dimensionales son en alguna ocasión deficitarios, siendo imposible atribuir los mismos a una causa concreta. En estos casos se hace patente la necesidad

de ampliar el conocimiento sobre el proceso.

Una necesidad tradicional de cualquier actividad industrial es la mejora de la productividad. Dentro del área de laminación en frío, está siempre presente la necesidad de aumentar la velocidad de trabajo de la línea. Solo con un refinamiento máximo de los sistemas de control empleados puede lograrse este objetivo, siendo necesario un aumento del conocimiento del proceso.

La filosofía del mantenimiento en la industria tradicional es proclive a la mejora. El mecanismo habitual de actuación es reparar la instalación una vez ocurrido un fallo. Sin embargo una producción moderna y competitiva debe ser capaz de reducir el impacto del mantenimiento a través de la creación de sistemas predictivos. El continuado desgaste de ciertos elementos críticos del sistema, obliga a un mantenimiento continuo a fin de reducir su impacto sobre el producto fabricado. La correcta identificación de ciertas tendencias en los modos de funcionamiento habituales de la planta permite atribuir estos deterioros de calidad a ciertos elementos de la instalación, ayudando en la toma de decisiones al equipo de mantenimiento.

En un proceso multivariable, como el que ocupa este trabajo, es muy complejo determinar las relaciones entre los diferentes aspectos que involucran el proceso de fabricación. Muchas de las relaciones conocidas han sido obtenidas a través de simplificaciones con lo que el grado de aproximación a la realidad es un factor importante a tener en cuenta. El análisis de las variaciones en el error de modelado puede apuntar a nuevos puntos de funcionamiento (estados) no recogidos en el grupo de estados esperables del proceso (llamadas condiciones). La identificación de estos nuevos estados se erige, por tanto, como una necesidad constante.

El análisis de un proceso industrial puede llevarse a cabo a través de varios enfoques [97][98][99]. Quizás el más habitual sea a través del establecimiento de modelos basados en ecuaciones analíticas. Sin embargo, en el caso de un proceso complejo, un enfoque basado en datos parece más abordable por muchas razones: gran cantidad de datos disponibles, flexibilidad, ...

El proceso de minería de datos ha sido ampliamente estudiado, estableciéndose metodologías muy conocidas (CRISP-DM [9]) y adoptando técnicas muy diversas. De esta manera el campo de la minería de datos es muy amplio, incluyendo desde mecanismos de filtrado de datos, a técnicas avanzadas de visualización pasando por complejos mecanismos de reducción de la dimensión y *clustering*.

De todos modos siempre ha habido una gran diferencia entre *la extracción misma del “conocimiento”* y el *uso práctico del “conocimiento”*. Las herramientas de minería de datos se encuentran en un estado maduro de desarrollo si bien no es fácil desarrollar casos prácticos reales donde demostrar su uso en el ambiente industrial. El entorno habitual de muchas de estas técnicas se circunscribe a laboratorios y otros entornos controlados. La realización de este tipo de estudios obliga, por un lado, a disponer de personal cualificado y por otro, a un consumo enorme de tiempo y recursos. Por todo ello la utilización de estas técnicas se encuentra alejada del personal no experto, impidiendo su uso habitual y con ello la penetración en las metodologías habituales de trabajo de las compañías industriales. Por tanto no existe, muchas veces, un sentimiento de “utilidad” de este tipo de herramientas en el seno de muchas fábricas modernas. Es por ello necesario, no solo desarrollar modelos eficientes desde el punto de vista del análisis, sino también con un alto grado de usabilidad y sentido de utilidad. En este sentido llevar a cabo cualquier estudio basado en datos, bajo una filosofía visual, puede ayudar a sacar estas técnicas más allá del entorno controlado de un laboratorio hasta una realidad industrial exigente.

Las necesidades descritas anteriormente motivaron esta iniciativa que, por un lado, desarrolla y explota una serie de herramientas encaminadas a la extracción del conocimiento mediante técnicas avanzadas de minería de datos visual y, por otro, obtiene nuevo conocimiento sobre episodios de funcionamiento anómalos en un tren de laminación en frío.

1.2.1. Objetivos

El objetivo general de esta tesis es la mejora del proceso de laminación en frío a través del uso sistemático de técnicas de análisis multidimensional. Dentro de la problemática propia del mecanismo de laminación, este trabajo se centra en un fenómeno muy particular y perjudicial denominado *chatter*, ver sección 3.2.4. Este fenómeno, de carácter vibratorio, ocasiona perjuicios importantes a la producción, falta de uniformidad en el espesor de salida, reducción de la velocidad de laminación y peligro para la integridad de la propia instalación principalmente. El origen de este fenómeno es difícil de describir, tratando, los capítulos experimentales de este trabajo, de caracterizar y modelar el fenómeno de manera simple y eficaz.

El estudio de este fenómeno se lleva a cabo a través del uso de técnicas

eminentemente visuales, tratando de explotar al máximo las capacidades humanas de reconocimiento visual de patrones. Como caso particular concreto se plantea la creación de modelos basados en datos a través de los denominados mapas auto-organizados (SOM, *self-organizing maps*). La utilidad, por ejemplo, del uso de mapas SOM [57] en *clusterización* y análisis de procesos industriales ha sido ya probada [58], [21]. Por otro lado el SOM posee innegables capacidades visuales, a través de la definición de planos de componentes, que lo hacen amigable y fácil de interpretar. Sin embargo un fenómeno de las características del *chatter* posee una dinámica muy rápida, siendo difícil caracterizar el mismo con un planteamiento ordinario del SOM basado en variables cuasi-estacionarias. En este sentido se debe desarrollar un estudio orientado a la definición de la dinámica del sistema que permita caracterizar perfectamente al fenómeno. En este sentido caben destacar los trabajos de [24] y [23] que parecen presentar un marco adecuado para los objetivos de este trabajo. La finalidad última consiste pues en extraer la mayor parte del conocimiento relacionado con el proceso del *chatter*, conocimiento que se condensará en diferentes formas: indicaciones de diseño, relaciones matemáticas, formulaciones cualitativas, ...; logrando así una caracterización eficaz del fenómeno, ampliando el rango de condiciones conocidas de la línea para un mejor seguimiento de su operación.

1.3. Definición del problema

La laminación en frío del acero es un proceso muy complejo con unas necesidades de calidad y nivel de producción muy restrictivas. Quizás el aspecto fundamental a controlar sea el espesor de salida de la banda, uno de los motivos principales del proceso. Será necesario mantener el mismo dentro de unas estrechas tolerancias que se suelen mover en torno al 0.3% sobre el valor nominal objetivo. Además el perfil de planitud de la banda debe ser controlado y homogeneizado a lo largo de toda su extensión. Los acabados superficiales también son críticos, sobre todo en materiales pensados para su aplicación como recubrimientos de objetos de uso diario (electrodomésticos, vehículos, ...). Pero además el proceso ha de ser lo más eficiente y rentable posible, es decir, ha de producir a la máxima capacidad posible con el menor número de material rechazado y averías.

Un tren de laminación está afectado por un amplio espectro de vibraciones. Este tipo de fenómeno provoca varios inconvenientes en la producción. Por un lado algunas vibraciones pueden afectar al perfil de espesor produci-

do, incidiendo de lleno en la calidad del producto final. Además un exceso de vibraciones puede perjudicar a los elementos mecánicos de la instalación además de limitar la velocidad de régimen de la línea. En este sentido se reconoce al *chatter* como una de las vibraciones más perjudiciales para un tren de laminación [37]. Varios son los efectos de este fenómeno vibratorio, siendo evidente que imprime una serie de marcas sobre el espesor de la bobina. Sin embargo, la capacidad de llegar a romper la banda en algunos casos y, sobre todo, las limitaciones a la velocidad máxima de laminación que su aparición establece son sin duda los mayores perjuicios ocasionados.

La naturaleza del *chatter* ha sido estudiada de manera teórica durante los últimos treinta años, estableciéndose la idea mayoritaria de la interacción entre fuerza de laminación y tiro (tensión) de la banda como origen de esta vibración de carácter autoexcitado [90]. Sin embargo, en múltiples ocasiones se ha detectado una falta de rigor y homogeneidad en la identificación del fenómeno, confundiendo, muchas veces, al *chatter* con otras vibraciones forzadas dentro de la banda de tercera octava. Además existen pocos estudios basados en datos reales y aún más en datos provenientes de una instalación industrial [64], en donde se puedan comprobar las características más importantes del fenómeno.

El modelado del fenómeno va parejo al nivel de detalle con el que se trate de modelar el propio proceso de laminación. De esta manera es posible encontrar modelos simples pero efectivos [111] u otros de mayor complejidad conceptual y matemática [50]. Algunos de estos estudios están orientados a la formulación de criterios de estabilidad del mecanismo vibratorio. Sin duda la enunciación de un criterio de estabilidad es de gran utilidad. Se tratará de definir una serie de valores límite para los cuales el fenómeno vibratorio aparece. En la práctica el esfuerzo se circunscribe a la definición de un valor límite de velocidad a partir del cual se produce el *chatter* [30][54]. Este límite es fundamental ya que, en la industria moderna, la principal arma para evitar el *chatter* es un control estricto de la velocidad de laminación.

Sin duda los estudios científicos del *chatter* son de sumo interés, pero hasta ahora no parece que hayan calado en los auténticos usuarios de los procesos de laminación, los encargados de planta. Es reconocida la dificultad de la aplicación de conceptos complejos en la industria real. En este sentido la orientación visual para el análisis, seguimiento y presentación de resultados representa una gran alternativa para la integración de nuevo conocimiento en planta [39][101]. Por otro lado el entorno industrial posee una serie de características respecto al modelado y disponibilidad de datos que sitúa, a

las técnicas basadas en datos, como una posible alternativa al problema de la monitorización y diagnóstico.

1.4. Metodología de trabajo

Este trabajo utiliza un conjunto de datos proveniente de una instalación de laminación en frío (tren tándem). Dicho conjunto comprende bobinas diferentes durante más de seis meses de operación de la línea, en total más de 2500 bobinas. Se dispone de una serie de variables para cada una de las bobinas, ver anexo A. Estas variables son de tres tipos diferentes:

- Variables muestreadas a 2 kHz
- Variables muestreadas a 1 Hz
- Variables tomadas una por bobina

El sistema *softdetect*[80] (ver sección 2.3) posee dos objetivos en este trabajo. Por un lado es el encargado de la captura, sincronización y almacenamiento de datos en planta, permitiendo un fácil acceso y exportación a los mismos. Por otro lado dispone de una serie de herramientas específicas para llevar a cabo un proceso de *data mining* y la capacidad de implementación de los modelos generados de manera directa y en tiempo real sobre el proceso físico.

En una primera etapa se utiliza el sistema *softdetect* para un análisis exploratorio de los datos, dando una idea de su estructura y de las relaciones entre las variables fundamentales (fuerzas, tensiones, ...), generando así una serie de estadísticos básicos que ayuden a entender el funcionamiento del proceso.

Una vez conocida la estructura de los datos, se utiliza ésta para desarrollar y ajustar un mecanismo simple de identificación del *chatter* (ver figura 5.14) y acotar así el grupo de bobinas que experimentaron este fenómeno. Sobre este subconjunto se lleva a cabo un análisis exhaustivo a través, por ejemplo, de la representación del espectrograma¹ de las variables más importantes. Este estudio permite caracterizar de manera cuantitativa muchos

¹El espectrograma representa, mediante un código de color, la magnitud de una señal en el tiempo (ordenadas) para un rango de frecuencias (abscisas).

aspectos del fenómeno y su formación, así como compararlo con el conocimiento existente en la actualidad.

Se aísla un grupo de bobinas con episodios de *chatter* bien definidos. Estos servirán de base tanto para estudios posteriores como para la prueba de modelos basados en ecuaciones analíticas y en datos. Los mapas SOM representan una manera eficaz de utilizar los datos capturados para la generación de un modelo que represente las relaciones fundamentales entre variables, de tal manera que sea posible caracterizar el *chatter* y permitir la identificación del mismo. Por otro lado el cálculo y representación de residuos se erige como una técnica eficiente para vislumbrar funcionamientos anómalos o al menos novedosos, sin embargo el cálculo de residuos basados en SOM posee unas características propias que son necesarias considerar para llevar a cabo un estudio provechoso.

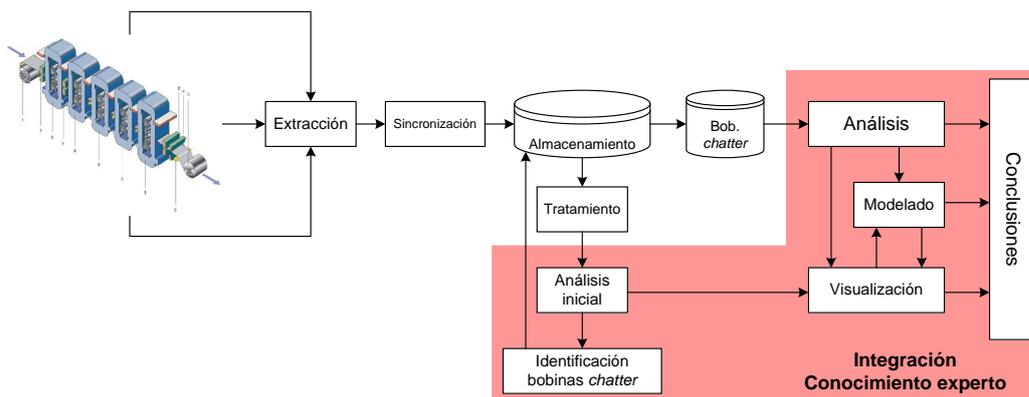


Figura 1.1: Esquemas de las etapas seguidas en este trabajo.

En todo momento se ha tratado de seguir un enfoque basado en datos mediante una filosofía visual, llevando a cabo aseveraciones basadas en la observación de las bobinas disponibles mediante herramientas gráficas como los mapas SOM o la representación visual de residuos.

Todo este estudio se lleva a cabo desde el punto de vista de la teoría clásica de laminación [87] y con la asistencia y opinión de expertos en el proceso, tratando siempre de incorporar conocimiento experto al estudio del proceso.

1.4.1. Datos e hipótesis de partida

Un primer condicionante a mencionar es la utilidad de los datos con los que se comienza el estudio. En el conjunto de bobinas iniciales no existía ningún tipo de campo que marcara ya sea el fenómeno de *chatter* o algún otro tipo de estado anómalo o novedoso del proceso. Por ello, la utilidad de los datos en un principio no era demasiado alta, convirtiéndose el trabajo en un análisis exploratorio donde no existían hipótesis sobre los datos. Las hipótesis de partida para la identificación del *chatter* se cimentaron, en un principio, en una vaga descripción cualitativa del fenómeno y sus efectos, por parte del personal de planta. Posteriormente los trabajos de [90][64][54][30] y sobre todo el extenso trabajo de [113] ha permitido ampliar el conocimiento del fenómeno.

Respecto al modelado cabe resaltar un punto importante como es la asunción de no deslizamiento. De esta manera la velocidad de la banda a la salida de una caja se asimila a la de giro del rodillo. Dicha simplificación se ha llevado a cabo por dos razones: la primera en aras de la simplicidad del modelo, estimando que su uso no implica un aumento sensible de la calidad de los resultados; en segundo lugar debido a la incapacidad de disponer de datos sobre el rozamiento en el área de mordida¹. Respecto al área de mordida, se supone un movimiento, debido a la vibración, restringido al plano perpendicular a la banda. Además el espesor de salida de la banda, en cada caja, es supuesto definido por la abertura de cilindros, aunque para el cálculo del grado de deformación en frío se supone un comportamiento elástico de la banda. Siguiendo con las simplificaciones, en este estudio se supone un contacto directo entre banda y cilindros, obviando por tanto la existencia de lubricantes y refrigeración. Respecto a los cilindros estos se suponen deformados por las fuerzas de apriete a través del cálculo de un radio equivalente. La caja de laminación es otra gran fuente de simplificaciones como se observa en el capítulo 6.

1.5. Estructura del trabajo

En el capítulo 2 se introduce brevemente el proceso de laminación en frío y se describen las partes fundamentales de la caja de laminación, así como su disposición y particularidades. Se hace especial hincapié en la estructura

¹En este trabajo se desarrollaron métodos de estimar dicho coeficiente de rozamiento, si bien al no poder validarlos se optó por no incluirlos en la presente memoria

de control del mismo, resaltando las estrategias clásicas de regulación y sus fundamentos físicos. Por último, y dada la importancia que el proceso de captura posee en un modelo basado en datos, se describe el sistema de adquisición y explotación de datos utilizado en diversas etapas de este trabajo y orientado al modelado de procesos complejos mediante minería de datos visual.

Dada la importancia que tiene el modelado del proceso mismo de laminación, el capítulo 3 presenta una extensa descripción de las características y evolución de los mismos en el tiempo, introduciendo términos y conceptos esenciales para la comprensión de este trabajo. En una segunda parte se introduce la problemática de las vibraciones en el proceso de laminación en frío, haciendo especial hincapié en la vibración objeto de este estudio, el *chatter*. Ambas partes de este capítulo presentan interesante bibliografía para introducirse en el tema.

El capítulo 4 repasa los diversos mecanismos de modelado aplicables a un proceso industrial dentro de los denominados sistemas de diagnóstico (FDI, *fault detection and isolation*), centrándose en aquellos modelos basados en datos. Además de la generación del modelo es importante definir bien la mecánica del cálculo de residuos utilizada. En este punto cabe destacar el estudio comparativo entre residuos generados por modelos SOM (utilizados en este trabajo) y por PCA (*principal component analysis*, técnica tradicional en este tipo de problemas). Por último se ilustra a través de diversos ejemplos reales una metodología de cálculo e interpretación de residuos ante un problema industrial.

Los tres últimos capítulos (5, 6 y 7) son sin duda los de mayor carga experimental del trabajo. En el primero se hace un análisis en profundidad de la vibración *chatter* en el tren de laminación en estudio: caracterización, manifestación, limitaciones, ... Se plantean ciertos interrogantes a partir de las observaciones y se discuten algunas afirmaciones encontradas en la literatura al respecto. El capítulo 6 trata de componer un modelo simple que recree el mismo, tratando de dar respuesta a varias de las incógnitas planteadas en el apartado anterior. Dicho modelo es ajustado y se comprueba su bondad con la realidad del fenómeno para un gran número de casos reales. De este modelo se derivan dos avances importantes: primero se analizan en profundidad ciertos parámetros básicos de la laminación y su influencia sobre la virulencia de esta vibración; en segundo lugar se establece un criterio interesante y de fácil manejo para el establecimiento de una velocidad crítica de laminación que evite el fenómeno del *chatter*. Por último el capítulo 7 plantea,

sobre la base del modelo teórico anterior, un nuevo modelo para caracterizar el fenómeno que aprovecha todo el conjunto de datos disponible. Este capítulo además presenta una estrategia para el estudio del *chatter* a través del uso de mapas de dinámica, un ejemplo más del enfoque visual y basado en datos al que se orienta esta tesis. Advertir que en general y salvo que se indique lo contrario se han tomado las unidades en el SI para todo el trabajo.

Ya en el capítulo 8 se sintetizan las conclusiones y aportaciones arrojadas por este trabajo y se definen las posibles líneas de investigación que abre este estudio.

Capítulo 2

La instalación de laminación en frío

2.1. La transformación de productos en frío

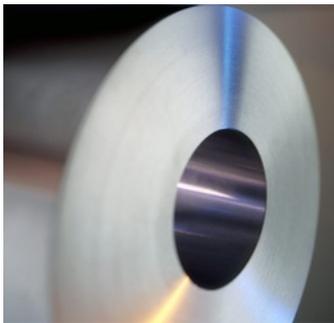


Figura 2.1: Producto en frío.

El producto de esta etapa suele utilizarse como *input* para otros procesos posteriores de alto valor añadido (galvanizado, pintado, ...) aunque también encuentra cabida en el mercado como producto final (figura 2.1).

En el mundo del acero, los procesos en frío son aquellos en los que se trata de transformar las características dimensionales de un elemento mediante transformaciones a una temperatura cercana al ambiente (en comparación con las temperaturas alcanzadas en los procesos en caliente). La transformación en frío es ya una de las etapas finales dentro del proceso siderúrgico integral. El mecanismo de laminación frío (un esquema simplificado en figura 2.2) comienzan con la recepción de bobinas obtenidas del tren de laminación en caliente. La laminación en caliente y el almacenamiento de las bobinas a la intemperie, producen sobre la superficie de la banda una serie de impurezas y óxidos perjudiciales para el aspecto superficial en el posterior proceso en frío. La línea de decapado tiene como objetivo la eliminación de éstos a través de una serie de baños del material en ácido. Otros elementos previos al tándem son las líneas auxiliares de saneo, encargadas de cortar bordes, mejorar planitud, etc.

Por otro lado, y después del tren tándem, es necesario aplicar al material un proceso de recocido a fin de rebajar su acritud (endurecimiento por deformación) y así disminuir su dureza y fragilidad. Este proceso suele hacerse en hornos, ya sea de campana o continuos, donde se le aplica un tratamiento térmico específico. Por último y para corregir excesos en el tratamiento de recocido, se procesa la banda a través de un tren temper. Su finalidad no es reducir el espesor sino sólo conseguir cierto grado de endurecimiento del material.

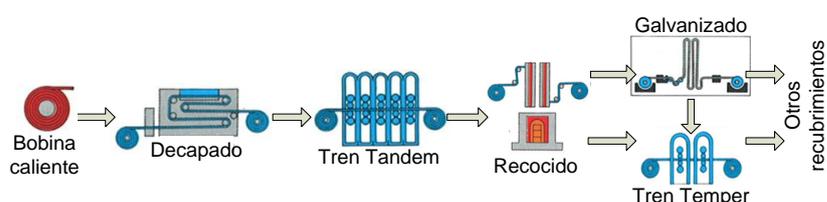


Figura 2.2: Procesos en frío [96].

2.2. El tren tándem

Se conoce como tren tándem a la instalación donde se consigue reducir el espesor de una banda de acero, mediante el paso sucesivo de la misma a través de un conjunto de cajas de laminación sincronizadas entre sí, figura 2.3. Está formado por un número determinado de cajas de laminación (típicamente cuatro o cinco), sistemas de bobinado y desbobinado, elementos de potencia y un gran número de mecanismos auxiliares. A pesar de ser un proceso con muchos años de historia, las instalaciones más competitivas disponen de la última tecnología a fin de producir productos con un alto valor añadido.



Figura 2.3: Tren tándem.

2.2.1. Partes funcionales

En la figura 2.4 puede observarse un plano esquemático de las partes fundamentales de un tren tándem. Nótese la ubicación de los sistemas sensores,

así como las diferentes guías para la conducción precisa de la banda. Este capítulo hará especial hincapié en los elementos de la caja de laminación y en los esquemas de control del mismo.

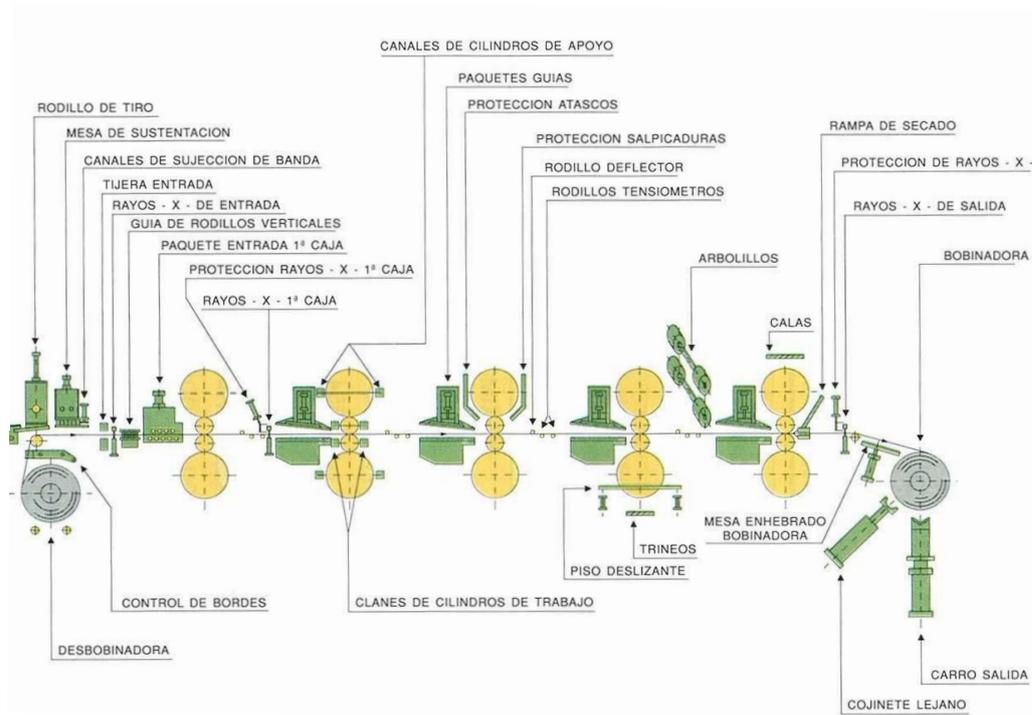


Figura 2.4: Esquema con la disposición de las partes esenciales del tren tándem[29].

2.2.2. La caja de laminación

La caja de laminación es sin duda el corazón del proceso de laminación. De manera muy simplificada estará formada por una estructura fija o castillete que da soporte a un conjunto de elementos móviles. Como elementos móviles (rotatorios) principales están los cilindros de laminación, denominados de trabajo o apoyo según estén en contacto con la banda o con el sistema de apriete. A lo largo de la historia varios han sido los diseños de cajas de laminación según la disposición y número de los cilindros. De esta manera, hasta el siglo XIX la configuración habitual era de dos cilindros. Posteriormente se introdujo una configuración de tres cilindros, con el del medio de menor diámetro, siendo ésta un diseño más ventajoso al requerir menos energía. Posteriormente aparece la típica configuración de cuatro cilindros (dos de trabajo en contacto con la banda y dos de apoyo para la transmisión

de la fuerza de apriete) e incluso con seis cilindros en diversas disposiciones, ver figura 2.5. Merece mencionar la existencia de los trenes Sendzimir de veinte rodillos capaces de grandes reducciones en una sola caja de laminación.

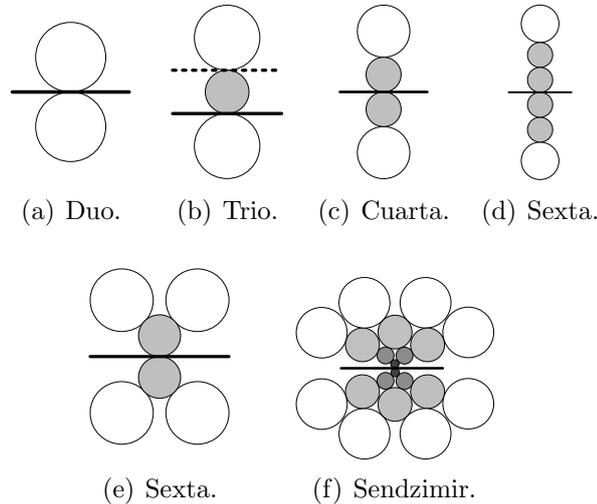


Figura 2.5: Diferentes configuraciones para una caja de laminación.

El tren de laminación en este estudio consta de cinco cajas cuartas, es decir con cuatro cilindros. El número de cajas dependerá del tipo de producto a fabricar, las necesidades de espacio y el sistema empleado. Es muy habitual encontrarse con sistemas de cuatro y cinco cajas e incluso de seis para grandes reducciones y acabados de alta calidad; al contrario, también existen trenes de dos e incluso una sola caja para aplicaciones especiales.

Los cilindros de laminación utilizados son de una importancia capital. De sus características mecánicas dependen parámetros tan dispares como el desgaste, calentamiento y evacuación de calor, elasticidad y por supuesto rozamiento. No se debe olvidar que el rozamiento es fundamental para llevar a cabo el proceso, de ahí que los cilindros de trabajo deban ser rectificadas a menudo a fin de asegurar un nivel determinado de rugosidad así como una superficie libre de defectos.

Un mecanismo básico de la caja de laminación es el sistema de apriete, necesario para imprimir fuerza sobre la banda. Dicho sistema aplica la fuerza desde los lados del cilindro de apoyo superior, siendo posible hacer una distribución asimétrica de la carga (mecanismo de *bending*). Es habitual encontrar dos tipos de sistemas para este apriete: a través de un tornillo accionado por un motor eléctrico o mediante un sistema hidráulico (este último utilizado

en el tren en estudio).

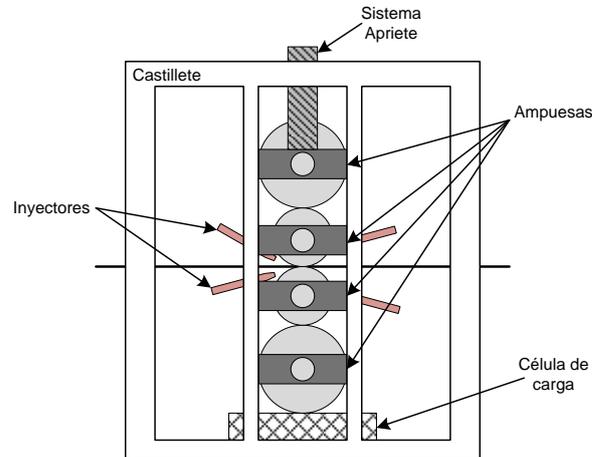


Figura 2.6: Esquema de las partes fundamentales de una caja de laminación.

Los cilindros están libres en dirección vertical. La unión del rodillo con la caja se hace a través de un elemento mecánico denominado ampuesa. Las ampuestas son cilindros concéntricos al eje del rodillo con rodamientos dentro, que permiten el giro del rodillo a la vez que su movimiento vertical. La traslación vertical de los rodillos puede considerarse una no linealidad del proceso, ya que el rozamiento con el castillete provoca una histéresis perjudicial.

Los rodillos de trabajo están unidos a través de sendos ejes y uniones articuladas a una transmisión accionada por potentes motores eléctricos. El funcionamiento de estos es vital para el tren. De hecho la mayor limitación que el sistema puede alcanzar, en cuanto a reducción y velocidad de laminado, viene determinada por la potencia de los motores instalados. Estos mecanismos de potencia y transmisión son una fuente de vibraciones constante que ha de ser monitorizada y controlada a fin de evitar defectos superficiales en el producto final.

La lubricación en el proceso de laminación en frío merecería un estudio aparte debido a su gran importancia y complejidad. Lleva a cabo una función doble: por un lado mantiene las condiciones de rozamiento estables en unos niveles determinados y por otro se encarga de evacuar calor de la banda y el área de mordida. El líquido lubricante puede variar desde componentes únicos (aceites lubricantes o grasa) a compuestos emulsionados (aceites mezclados con agua). El tren en estudio es lubricado a través del uso de emulsiones de gran densidad (alto contenido en grasa) mediante aplicación

directa (en circuito abierto) a la entrada de la caja sobre la banda y los rodillos de trabajo. A su vez existe un sistema de refrigeración encargado de controlar la temperatura de los rodillos de laminación, formado por una serie de inyectores de agua dispuestos a la salida de la caja y en paralelo con los rodillos. Según la cantidad de inyectores activados y el grado de abertura de los mismos se mantendrá una temperatura óptima.

2.2.3. Sensores y sistemas de control

El laminado en frío de bobinas de acero es un proceso complejo bajo el prisma del control, derivado de la gran cantidad de parámetros existentes y de la dinámica e interacción de los mismos. A pesar de que en la práctica varios son los parámetros y estrategias de control utilizados, se pueden resumir en dos las variables objetivo fundamentales: el espesor de salida y la tensión entre cajas (a veces incluso la fuerza total). A su vez las acciones de control se llevarán a cabo sobre la abertura de cilindros y la velocidad de giro de los rodillos, siendo por tanto los actuadores fundamentales el sistema hidráulico de apriete y los accionamientos eléctricos del tren. Otra variable importante es el nivel de planitud de la banda, aunque éste se considera de manera aislada [87] y no se menciona en este estudio.

Cada una de las cajas de laminación con sus tensiones y fuerzas forman un conjunto multivariable que se acopla a las demás cajas, vía instantánea a través de las tensiones, o con cierto retraso a través de la evolución del espesor.

En el trabajo de Bryant [7] se define un concepto fundamental para el posterior desarrollo de cualquier sistema de control: cualquier tensión o valor de espesor en el tren podrá ajustarse sin afectar de manera significativa a las otras tensiones y espesores.

Mediante el uso de unos conceptos y simplificaciones fundamentales tales como: el deslizamiento (f) (2.1), relación entre la velocidad del rodillo (V_R) y la de la salida del área de mordida (V_s); la ecuación de continuidad de flujo másico (considerando ancho y densidad del material constante) (2.2) que relaciona el producto velocidad (V) por espesor (h) en los diferentes puntos de la banda, especialmente a la entrada y salida; y la relación lineal (M) entre el espesor de salida (h_s) y la fuerza (F), para una abertura inicial (s_0) de cilindros (2.3), se construyen las interrelaciones entre las diferentes variables fundamentales del proceso.

$$f = \frac{V_s - V_R}{V_R} \quad (2.1)$$

$$V_e h_e = V_s h_s = V h \quad (2.2)$$

$$h_s = s_0 + \frac{F}{M} \quad (2.3)$$

Así aparecen expresiones que relacionan los cambios en las tensiones entre cajas y espesor a la salida de la banda con las variaciones de velocidad y *gap* (abertura cilindros), teniendo en cuenta todas las interacciones posibles con el resto de cajas (en [79] aparecen demostradas estas relaciones). Aunque esta aproximación presenta en la actualidad algunas carencias, sigue siendo un buen punto de partida para la comprensión del problema de control en este tipo de aplicaciones.

El control práctico de la tensión entre cajas puede llevarse a cabo a través de dos estrategias: el control por *gap* o por velocidad. En el control por *gap* se controla la variación de tensión a través del cambio en la abertura entre cilindros. Aprovechando la propiedad por la cual un cambio en el actuador de posición afecta en mayor medida a la tensión trasera que a la delantera, se suele plantear un control de tensión en base a la abertura de cilindros de la caja aguas abajo, ver figura 2.7(a) con la alimentación hacia delante del tensiometro hacia el sistema hidráulico de posicionamiento (H). Sin embargo en el control de tensión por velocidad la tensión entre cajas es modificada a través del control sobre el regulador de velocidad de la caja anterior, ver figura 2.7(b) donde la señal de tensión realimentará al regulador de velocidad del motor (M). En (2.4) se describe como la diferencia de velocidades a la entrada y salida de cajas contiguas produce variaciones del valor de la tensión entre ellas ($\dot{\sigma}$). Destacar que ambos controles pueden utilizarse de manera simultanea a fin de aumentar el rendimiento general del control de tensiones.

$$\dot{\sigma}_{i,i+1} = k(V_{e_{i+1}} - V_{s_i}) \quad (2.4)$$

El control del espesor es algo más complejo, requiriendo de una serie de lazos que compensen los distintos acoplamientos que se dan en una supuesta modificación del espesor de salida de una caja. Se conoce como AGC

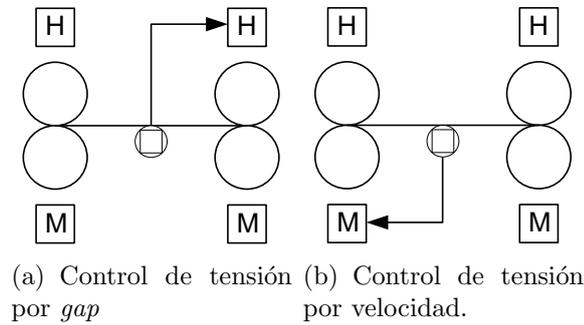


Figura 2.7: Estrategias control de tensión.

(*automatic gage control*) al conjunto de sistemas encargados del control de espesor de la bobina a través del cambio en la abertura de cilindros. En un planteamiento clásico puede contener los siguientes lazos de control:

- El lazo esencial de ajuste de la abertura de los cilindros.
- Un control *feedback* del error de espesor.
- Un control *feedforward* del error de espesor.
- Un control de flujo de masas.

El sistema de ajuste del *gap* se encarga de controlar la abertura de los rodillos de trabajo. Es el sistema principal del AGC ya que la acción de control de mayor ajuste sobre el espesor se lleva a cabo con esta abertura entre rodillos. Desarrollado a fin de estimar el espesor de la banda pero sin requerir una medición directa, trata el castillete como un muelle que sufre una elongación según la carga aplicada. El sistema no es completamente rígido y por tanto las variaciones en el espesor así como los defectos de forma de la banda afectan a la posición del rodillo al “estirar” la caja. No se trata pues de controlar la abertura del rodillo de trabajo sino la fuerza aplicada a través de la posición del cilindro hidráulico de carga (2.3). Dicho sistema hará uso de la lectura de células de carga o medidas de presión, en caso de haber un sistema de apriete hidráulico, para estimar con exactitud la fuerza de laminación en juego.

El control *feedback* proporciona el modelo de control y medición más simple y universal. A través de una galga de rayos X (figura 2.8) se estima el error de espesor de la banda (espesor salida medido-espesor salida objetivo) y se realimenta el lazo bien hacia los actuadores de posición o a los accionamientos de velocidad. Por ejemplo, es habitual realimentar el regulador

de posición de la caja 1 desde una galga a la salida de dicha caja con muy buenos resultados en el rendimiento general. De la misma manera y en ciertas estructuras de control, una galga a la salida del tren suele realimentar los accionamientos de velocidad de algunas cajas aguas arriba a fin de mejorar el espesor. Es importante recordar que dicha medición se lleva a cabo después de que el material haya salido de la zona de contacto con los cilindros, lo que significa que ha habido un retraso entre la modificación del espesor y su medición. Este retraso afectará a la dinámica del control, limitando el ancho de banda del sistema. Este tipo de control es considerado lento aunque muy útil para eliminar errores con periodos prolongados.

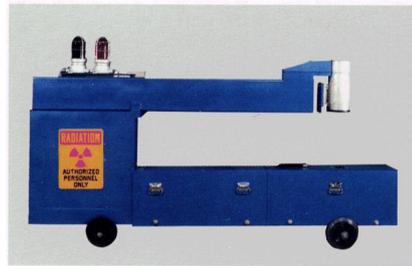


Figura 2.8: Galga de rayos X para la medición del error de espesor.

Con la introducción de un lazo *feedforward* se consigue un avance significativo en el rendimiento del sistema. La banda suele presentar variaciones de espesor cíclicas debido a procesos previas como la laminación en caliente. En general se hallan en una frecuencia que no puede ser corregida por el *feedback* siendo necesarios nuevos lazos de control. Un planteamiento clásico consiste en medir el espesor de la banda que entra y ajustar la posición del cilindro de carga basado en esta señal previa, para después, tras la compensación por el retraso en el transporte, ajustar las velocidades de las cajas aguas abajo.

La disposición perfecta de un lazo *feedback* sería colocar el dispositivo de medición de espesor en la ventana del laminador y de esta forma, obtener una realimentación instantánea de la acción de control. Sin embargo no es práctico medir el espesor de la banda directamente en la mordida por diversos motivos técnicos. No obstante, sí es posible extraer una medida instantánea del espesor de salida siempre que esté basada en otras magnitudes medibles. Estos sistemas se conocen por el nombre de control de flujo másico. Como en el laminado en frío no se da ninguna expansión lateral del material, se asume un flujo de masa constante a lo largo de la banda, pudiéndose expresar este como el producto de la velocidad por el espesor en cada uno esos puntos, ver (2.2). Por tanto basta con medir la velocidad de entrada y salida de la

banda, así como el espesor de entrada para determinar el espesor de salida. Sin embargo este proceso requiere mediciones exactas de las velocidades a la entrada y salida así como del espesor de entrada, sólo posibles a través del uso de sofisticados sensores no siempre disponibles.

Un modo de explotación de este control implica mantener un valor del flujo de masas en una caja para, en otra, a través del control de velocidad, mantener el espesor constante. Es habitual la designación de una llamada caja piloto cuya velocidad no se ajusta por los mecanismos típicos de control y sirve como referencia para el resto de cajas. Con la medida del espesor de salida de esta caja piloto será posible gobernar la velocidad de las otras cajas para un espesor determinado. Otro modo de explotación consistirá en calcular el espesor de salida de la primera caja para después hacer un seguimiento del mismo a través del resto del tren, calculando así el espesor de salida de cada caja a través de la ecuación de continuidad en combinación con medidas exactas de la velocidad de salida de cada caja.

Es incluso posible contemplar en el bucle todos los factores molestos del laminador (coeficientes de fricción, ...), obteniendo un lazo de control muy robusto capaz de hacer frente a situaciones fuera de las condiciones óptimas de funcionamiento (aceleración, deceleración, cambios de tensión, ...).

En la figura 2.9 puede observarse el diagrama simplificado del sistema de control del tren estudiado en este trabajo. Puede observarse como el control de la tensión desde la caja 2 a la 4 ($T12$, $T23$ y $T34$) se lleva a cabo a través de una doble estrategia de control por *gap*/velocidad. Parece además, que la acción de control de las cajas aguas abajo se reparte entre las anteriores, mejorando el reparto de tensiones. Mención aparte es el control de la tensión entre las cajas 4 y 5 ($T45$) donde el sistema parece estar preparado para un control muy fino con realimentaciones a la caja delantera y trasera, sin duda alguna motivado por la importancia de la calidad del producto en las etapas finales del proceso.

El control de espesor en esta instalación se lleva a cabo mediante estrategias de *feedback*, *feedforward* y control de la apertura de cilindros, utilizando galgas de rayos X para la medición del espesor a la entrada de la caja 1 y a la salida de la caja 1, 2 y 5 (esta última dispone de una doble galga para medidas redundantes). En las cajas 4 y 5 existe un lazo de realimentación ($FB5$) SISO donde se ajusta la velocidad y posición del *gap*, en base al error de espesor medido a la salida del tren. Este lazo junto con el de tensiones son los encargados de eliminar las desviaciones del error y de asegurar la calidad

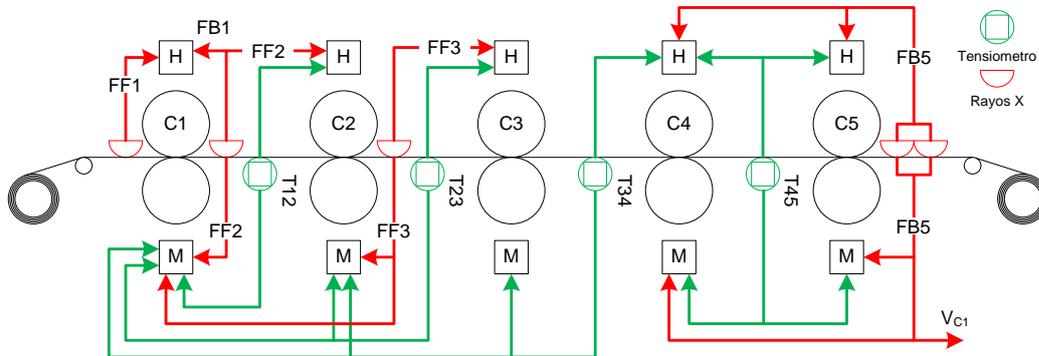


Figura 2.9: Diagrama simplificado con los diferentes lazos de control del tren, sensores y actuadores (H, sistema hidráulico; M, control motores).

del producto final. En la caja 1 se dispone de otro lazo de realimentación (*FB1*) que actúa sobre el *gap*. Este tipo de lazos es de respuesta lenta y está indicado para variaciones con un periodo largo, habituales de los procesos anteriores. Cabe recordar que en este sistema la caja piloto es la número 4, gobernando a partir de ésta el resto de la instalación. El sistema dispone de 3 lazos *feedback* además de una estrategia *feedforward* en las cajas 1, 2 y 3. El de la caja 1 (*FF1*) se alimenta de las lecturas de la galga a la entrada del tren y actúa sobre el sistema hidráulico de dicha caja, mientras que los de 2 y 3 (*FF2* y *FF3*) lo hacen además sobre la velocidad de la caja anterior a fin de preservar la continuidad de masa.

A través de los apuntes anteriores se describe una aproximación básica a los lazos de control habituales de un sistema de laminación en frío así como las ecuaciones físicas que los gobiernan. En la actualidad existen mecanismos más complejos de control: H^∞ [63]; sistema MIMO con observador [49]; ... Sin embargo los elementos mencionados forman el núcleo de funcionamiento de la mayoría de los trenes actuales en marcha.

2.3. El sistema monitorización y minería de datos *softdetect*

El sistema *softdetect* se desarrolla como mecanismo de generación e implementación en tiempo real de modelos basados en datos, independiente además de la aplicación o línea industrial asociada. Pensado para trabajar en entornos multivariables altamente complejos, la aplicación posee una se-

rie de herramientas avanzadas que permiten el estudio de grandes conjuntos de datos mediante técnicas de *data mining*. En este trabajo la el equipo fue utilizado en una instalación de laminación en frío sobre un tren tándem.

Desde la adquisición misma de los datos al uso final de un modelo sobre el proceso, el usuario dispone en todo momento de completa información sobre el conjunto de datos y una biblioteca con las funciones de análisis más variadas y útiles. Uno de los objetivos claros es el de permitir llevar a cabo un proceso de análisis de manera rápida, sin la necesidad de una etapa de exportación de datos a otros sistemas, para una posterior aplicación de una metodología de extracción de información (KDD). El sistema desarrollado ha demostrado ser una herramienta útil y universal capaz de proporcionar un mantenimiento avanzado de la línea.

2.3.1. Estructura del sistema

El sistema se vertebra en torno a tres bloques con las siguientes funcionalidades:

- Adquisición de datos y monitorización *on-line*
- Análisis de datos *off-line* para preparación de datos y extracción de características.
- Gestión de modelos y reglas generados.

Adquisición de datos y monitorización *on-line*

La aplicación *on-line* adquiere información de señales muestreadas a través de tarjetas de adquisición propias del sistema *softdetect* y de variables del ordenador de proceso de la planta. La lista de variables de proceso incluye: número de bobina, tipo de material, ancho de la bobina, temperaturas, indicadores de calidad ... Las analógicas incluyen: velocidad en cada caja, fuerzas de laminado, vibraciones, ... La lista completa de variables se encuentra disponible en el anexo A.

En términos de *hardware* el equipo se compone de un ordenador dedicado y varias tarjetas de adquisición dentro de un armario especial de protección para ambientes industriales agresivos. El ordenador está equipado con tres tarjetas de adquisición para la captura de las señales de campo y una serie

de filtros para evitar posibles problemas de aliasing, además cuenta con interfaces de red para su correcta integración en el esquema de comunicaciones de la planta. En la figura 2.10 se observa el equipo dentro de las instalaciones del tren de laminación.



Figura 2.10: Armario con PC de adquisición y el cableado de las señales de campo.

Básicamente la herramienta posee dos modos de funcionamiento: el funcionamiento en *vacío* y el modo *normal*. El modo *vacío* permite obtener información sobre excentricidad y otras condiciones generales, de los rodillos y el tren, sin la influencia de la banda siendo procesada. Este tipo de información proporciona la “huella dactilar” de los nuevos rodillos en el inicio de una campaña de laminación. Gracias a esta aplicación los técnicos encargados de la operación pueden seguir el comportamiento de los rodillos de trabajo a lo largo de su vida útil. El objetivo del modo *normal* es la monitorización del estado del tren. Se lleva a cabo a través de la adquisición de variables durante el proceso mismo de laminación. Los principales indicadores de calidad aquí vigilados, dentro de las variables disponibles en este modo de funcionamiento, son el espesor de la banda (señal analógica) y el rango de tolerancia $\pm 0,3\%$ (señal del ordenador de proceso).

Las señales de campo son procesadas en bloques y calculado para cada

uno de ellos los valores de media, valor eficaz y valor eficaz en bandas de frecuencia. Además se pueden crear nuevas variables a través de la combinación de las existentes mediante operadores algebraicos. La información mostrada en tiempo real por la aplicación de monitorización es:

- Señales en el dominio del tiempo.
- Señales en el dominio de la frecuencia (FFT).
- Estadísticos básicos (media, desviación, máximo, mínimo).

La apariencia de la ventana principal se muestra en la figura 2.11. Esta ventana muestra el espectro de las fuerzas (lado operador, lado motor y total) y la vibración de la caja seleccionada con etiquetas con las frecuencias características de los rodillos y sus múltiplos. Los valores de medias, desviaciones y máximos/mínimos aparecen al lado de las gráficas. En la figura 2.11 se observa un ejemplo de la aplicación mostrando las señales de campo simultáneamente en el tiempo y en frecuencia.

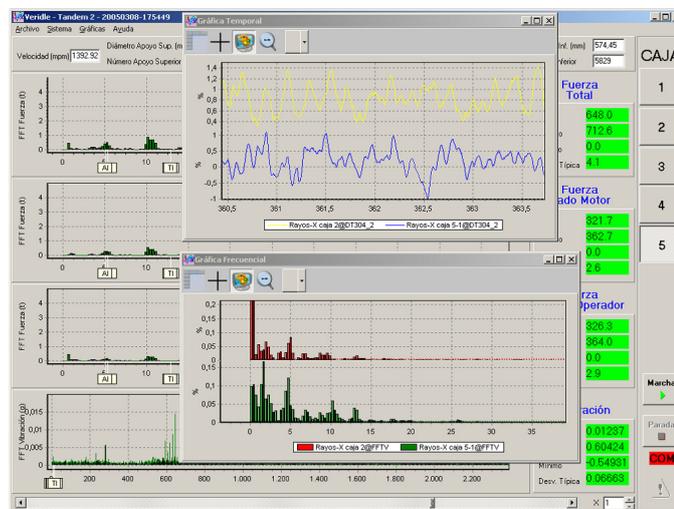


Figura 2.11: Ventana principal de la aplicación de adquisición con ventanas secundarios.

Análisis de datos *off-line*

La aplicación de análisis de datos *off-line* está dedicada al análisis de los datos adquiridos por la aplicación *on-line*. El objetivo de esta herramienta es la definición de características que contengan la mayor información posible

sobre los posibles estados de funcionamiento del tren.

Este proceso comienza con la selección de las bobinas y variables a tener en cuenta. En esta fase el usuario puede seleccionar el valor representativo de cada variable (media, valor eficaz, valor eficaz en bandas de frecuencia, ...) o cualquier combinación algebraica de las mismas. La aplicación se diseñó con las miras puestas en la aplicación de procedimientos de *data mining* visual. Sobre esta idea se implementaron varias técnicas de visualización: representación temporal, diagramas de dispersión de puntos, *table lens*, *pdf scatter plot* (diagramas de dispersión con la densidad de probabilidad incorporada mediante colores), PCA (análisis de componentes principales), gráficos de correlación y mapas auto-organizados (SOM).

En todo momento se tiene información visual completa sobre los datos analizados. Por ejemplo, en cada gráfico, la bobina a que se refiere cada punto puede ser identificada con un color y un símbolo diferentes. Además los ejes y el resto de parámetros de visualización son altamente configurables, permitiendo una gran versatilidad a la hora del análisis, ver figura 2.12.

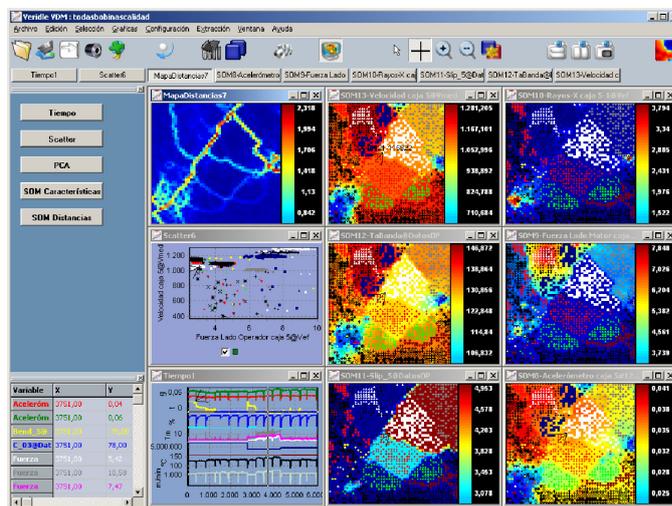


Figura 2.12: Ventana principal de la aplicación de análisis mostrando un mapa de distancias (arriba izda.), seis mapas de componentes (dcha.), una dispersión de puntos y una temporal.

Aplicación del gestor de modelos

Esta aplicación se diseña para la generación y gestión de modelos a partir de las características y datos obtenidos con ayuda de las aplicaciones anteriores. Combina dos clases de modelos: modelos a partir de la reducción de la dimensión (SOM) y modelos basados en reglas.

El uso de las aplicaciones anteriores habrá permitido establecer una serie de características que definan estados de funcionamiento de la planta en estudio a través de la generación de un SOM. Es misión del gestor darle la categoría de modelo a través de la definición de las diferentes condiciones de funcionamiento (figura 2.13).

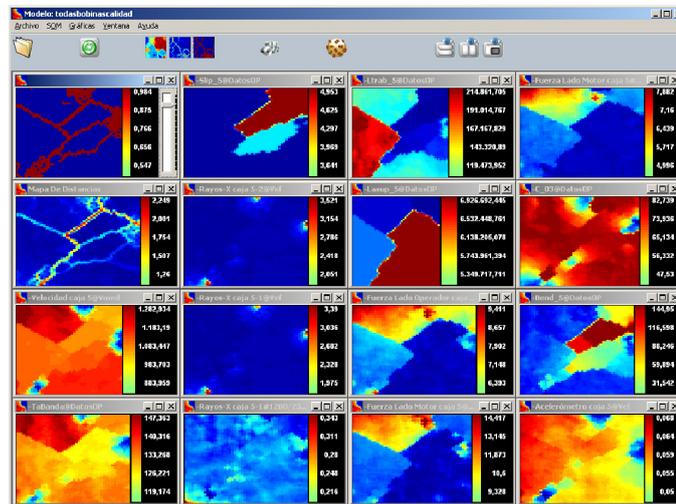


Figura 2.13: Ventana ppal. del gestor de modelos mostrando algunos mapas de componentes, un mapa de distancias umbralizado (arriba izda.) y otro corriente.

El gestor de modelos permite almacenar y cargar en la aplicación *on-line* los modelos por él definidos. El modelo así cargado contiene la configuración necesaria para definir un punto de funcionamiento en tiempo real representando el estado instantáneo del proceso. Mediante la representación gráfica de este punto de funcionamiento sobre el mapa del modelo definido será posible analizar la evolución del proceso sobre las diferentes condiciones de funcionamiento del tren previamente definidas, así como orientar a la identificación de otras nuevas. De igual manera es también posible visualizar gráficamente, sobre la aplicación *on-line*, el valor de los residuos, ver figura 2.14.

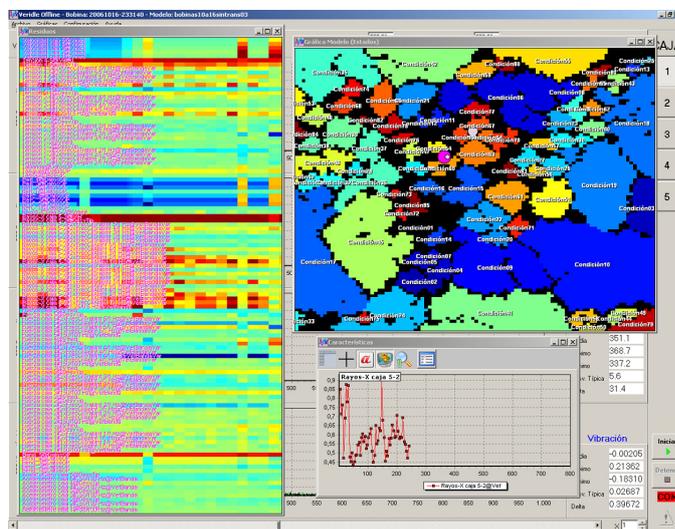


Figura 2.14: Monitorización del tren con modelo SOM. Se observa sobre la ventana de adquisición: ventana de residuos (izda.), mapa de estados (arriba dcha.) y una representación temporal (abajo dcha.).

Capítulo 3

Aspectos científico-técnicos de la laminación en frío

3.1. Modelado de trenes de laminación en frío

3.1.1. Introducción

La laminación de metales ha sido una de las primeras actividades industriales del hombre moderno. Desde los primeros intentos, en la antigüedad, de obtener láminas de metales preciosos a los procesos actuales en trenes tándem, muchas han sido las aplicaciones y diferentes tecnologías utilizadas. Sin embargo, a pesar de ser un procedimiento tan común, aún hoy es un área de investigación importante plagada de interrogantes. En muchas ocasiones los nuevos avances realizados en el área plantean nuevos y más complejos retos.

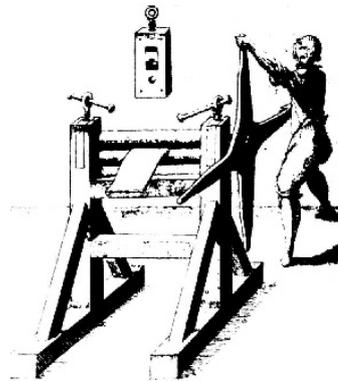


Figura 3.1: Laminación.

Los actuales sistemas de laminación son fruto de la evolución constante de la técnica. La gran heterogeneidad de elementos que los conforman (refrigeración, lubricación, sistemas de potencia, ...) hacen necesario la interacción de diferentes mecanismos de control para asegurar una producción de calidad. Todo este desarrollo se basa en el modelado físico del proceso de reducción de espesor del material. De esta manera las complejas interacciones durante el aplanado entre el material, rodillos, lubricantes, etc ..., han de ser correc-

tamente definidas para lograr resultados óptimos.

Los tipos de modelos aquí referidos son de carácter analítico, donde una serie de expresiones matemáticas relacionan diferentes aspectos y parámetros involucrados en la laminación. Las principales variables de control en este proceso son la fuerza de laminación aportada por los rodillos de trabajo y el tiro o tensión a la que se somete a la banda, siendo la variable objetivo el espesor de salida del material.

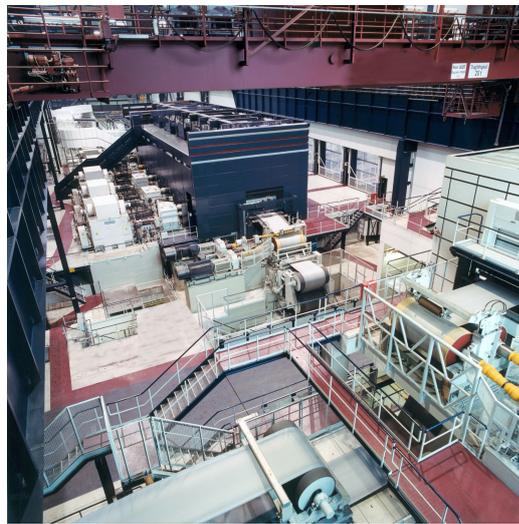


Figura 3.2: Instalaciones de un tren de laminación moderno.

Tres son los grandes elementos que interactúan en el proceso de laminación: el material a laminar, el lubricante y los rodillos de trabajo. El comportamiento exacto de cada uno de ellos es extremadamente difícil de describir con exactitud. Por ello se llevan a cabo una serie de simplificaciones y asunciones que son las bases de los diferentes modelos de laminación. Muchos de estos modelos requieren un aparato matemático inviable para su implementación en sistemas industriales y sin embargo poseen una incuestionable utilidad a nivel conceptual. Otros modelos, por otro lado, se desarrollan atendiendo a la eficiencia computacional y a unos buenos resultados prácticos.

Cada uno de los elementos críticos de la laminación tiene su propia problemática en el proceso de modelado. El material a laminar, en un proceso de laminación en frío, va a experimentar una importante reducción de espesor a una velocidad muy elevada. Esta particularidad hace que algunas propiedades mecánicas del mismo (en especial el límite elástico, ...) varíen

respecto a los valores propios de los ensayos normalizados. Además, durante el proceso mismo de laminación el material experimentará diferentes estados de deformación (elástico, plástico, fluencia, ...) que son por un lado difíciles de modelar y por otro complejos de delimitar. Esto y otras características secundarias convierten el modelado del material en un reto importante.

En cuanto a la lubricación de la laminación, el problema estriba en estimar el estado de fricción. En primer lugar es necesario conocer qué elementos se ven implicados en el área de mordida, pudiendo considerar solo la interacción banda-material o también la introducción de un lubricante y sus propiedades asociadas entre ambos. Por otro lado, muchos modelos consideran un estado friccional al que le corresponde un único valor de rozamiento. Las primeras preguntas surgen en cuanto a cómo calcular ese valor y si de verdad es constante en todo el área de mordida. Se acepta mayoritariamente la existencia de un punto neutro en el área de mordida donde las velocidades de rodillo y banda se igualan, estando el resto del área dominada por una mezcla de fricción y deslizamiento. Nadai [71] propone un modelo con tres condiciones de fricción diferentes: (a) un coeficiente de fricción constante, (b) un valor de la tensión tangencial (τ) derivada del rozamiento constante y (c) un valor de fuerza friccional relacionada con la velocidad de deslizamiento. Los estudios más actuales consideran características hidrodinámicas en la lubricación, basándose en el fenómeno por el cual al aumentar la velocidad del proceso, menos fuerza de laminación es requerida.

Los rodillos de laminación plantean también una serie de cuestiones importantes. A pesar de que los modelos iniciales tratan al rodillo como un sólido rígido indeformable parece claro que los mismos están sometidos a un determinado perfil de presiones que, forzosamente, deforman su perfil circular. En este sentido los intentos por describir con exactitud la forma del rodillo en el área de mordida, ver figura 3.3, han llevado a ciertos autores a plantearse dos cuestiones. Por un lado, cómo es exactamente el perfil de presiones que el rodillo experimenta en el área de mordida, y por otro, cómo deforma el mismo al área de contacto de laminación. No se debe olvidar que evaluar correctamente el área de contacto banda-rodillo es vital para modelar las condiciones de rozamiento del proceso, ya que ambos aspectos están íntimamente relacionados. Por suerte parece haber un amplio acuerdo sobre el uso del trabajo de Hitchcock [48] para el cálculo de un diámetro equivalente, en el modelado del rodillo deformado.

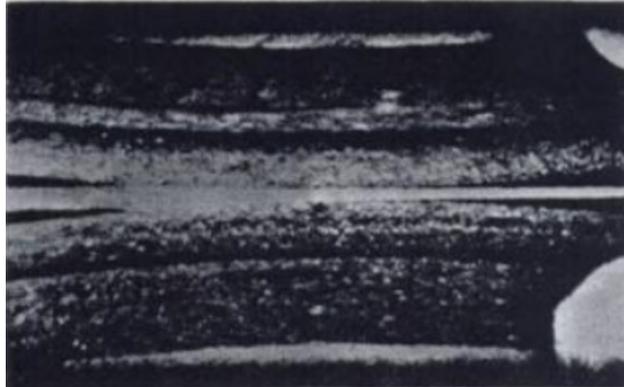


Figura 3.3: Área de mordida en el proceso de laminación en frío [55].

3.1.2. Modelos estáticos

Los primeros modelos de interés científico fueron publicados por Von Karman [103] durante el año 1925. En ellos se definen los parámetros fundamentales de la teoría de laminación: ángulos, fuerzas de rozamiento, presiones de laminado, reducción, límite de elasticidad del material, ... A través de una ecuación diferencial se establece un modelo que se apoya sobre ciertos supuestos y simplificaciones del proceso y el material. Las simplificaciones de partida, adoptadas posteriormente por muchos otros autores, incluyen:

- La banda de acero constituye un medio continuo sin cambios de propiedades bruscos.
- Las propiedades mecánicas o bien no se alteran a pesar de la deformación sufrida o bien lo hacen de una manera predecible a lo largo de toda el área de contacto.
- El proceso de laminado (presión sobre la banda) es homogéneo durante la deformación plástica del material. En general se considera que las secciones planas se mantienen planas tras la laminación, ver figura 3.4.
- En el proceso de compresión no se da deformación lateral, es decir, no se altera el ancho inicial de la banda. De esta manera el mecanismo de laminado puede ser estudiado como un proceso de dos dimensiones.
- Se supone una distribución uniforme del lubricante a lo largo del área de mordida entre banda y rodillos. Ésta es una de las asunciones más críticas, ya que en realidad las características de rozamiento dependen de la lubricación. Por otro lado la capa de lubricante puede no ser

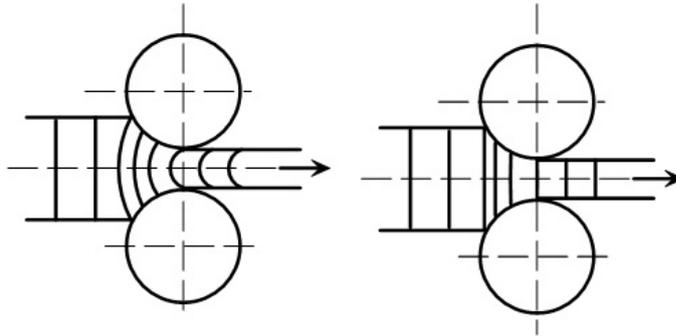


Figura 3.4: Compresión no homogénea y homogénea.

homogénea a lo largo de la mordida, variando las propiedades de fricción en la misma.

- En la mayoría de las teorías se suponen los rodillos completamente rígidos, de ahí la consideración de un radio constante en el área de mordida. Trabajos posteriores [48] suponen la deformación elástica de los mismos que afecta a la forma de la curva de mordida. En (3.1) se encuentra esta expresión, donde se tiene en cuenta el coeficiente de Poisson (ν), la fuerza de laminación (F), el ancho de la banda (w), el módulo elástico del material (E) y la diferencia entre el espesor de entrada y el de salida (Δh).

$$R_m = R \left(1 + \frac{16(1 - \nu^2) \frac{F}{w}}{\pi E \Delta h} \right) \quad (3.1)$$

- El ángulo de contacto entre el rodillo y la banda se supone muy pequeño, es decir, el tamaño del rodillo es muy grande en comparación con el espesor de entrada de la banda.
- La aceleración de la banda en la mordida es despreciable, debido a que la energía presente en este proceso es despreciable en comparación a la necesaria para la deformación del material.
- Los efectos térmicos en la laminación en frío son despreciables a pesar de que durante la deformación la temperatura en el área de mordida asciende sensiblemente. Esta simplificación ayuda a suponer muy poco variable el límite elástico del material así como las características de lubricación durante la laminación.

La operativa de estos modelos es muy típica. El objetivo final es casi siempre obtener el valor de fuerza del sistema de apriete y de par sobre los rodillos, necesarios para llevar a cabo un proceso de reducción en unas condiciones dadas. El mayor esfuerzo estriba en alcanzar una expresión que describa con exactitud el perfil de distribución de presiones en el área de mordida. Una vez definido será necesario un proceso de integración de la expresión para lograr el cálculo de fuerza y par. Obviamente, de la complejidad de la expresión de la distribución dependerá la posibilidad del proceso de integración y con ello de resolución del modelo. En este sentido es habitual la asunción de simplificaciones de diferente naturaleza, de tal manera que sea posible el cálculo de la integral en unas condiciones de tiempo y recursos apropiados a los fines de un proceso real.

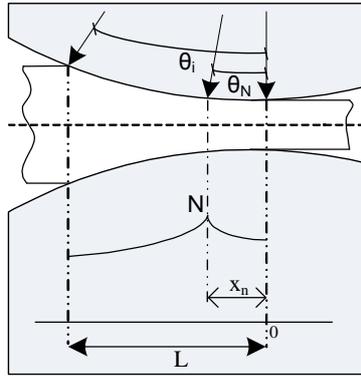


Figura 3.5: Distribución de presiones según Von Karman del tipo *friction-hill*.

El modelo de Von Karman [103] sienta las bases de muchos trabajos posteriores. El modelo describe la distribución de presiones a lo largo del área de contacto (mordida) asumiendo un coeficiente de rozamiento (μ) constante. Este modelo asume una distribución de presiones en la mordida como el de la figura 3.5, donde se alcanza un máximo en el denominado punto neutro (N). En la misma figura es posible definir el ángulo de mordida (θ_i) y el ángulo neutro (θ_n).

Como se observa en la figura 3.6, existirá una distribución de presiones (P) a lo largo del área de contacto entre banda y material (área de mordida). Tomando una sección infinitesimal de la banda, la fuerza, de carácter radial, soportada por este elemento será $P \frac{dx}{\cos \theta}$ ¹. La componente horizontal de esta fuerza que se opone a la entrada de la banda quedará por tanto $P \tan \theta dx$.

Por otro lado en el área de contacto se producirá una fuerza normal a la presión radial existente derivada del rozamiento. Teniendo en cuenta μ como el coeficiente de rozamiento del proceso, esta fuerza será $\mu P \frac{dx}{\cos \theta}$. La compo-

¹Este tipo de modelos se calculan sobre una sección del ancho total de la banda, siendo por tanto las fuerzas manejadas de carácter específico

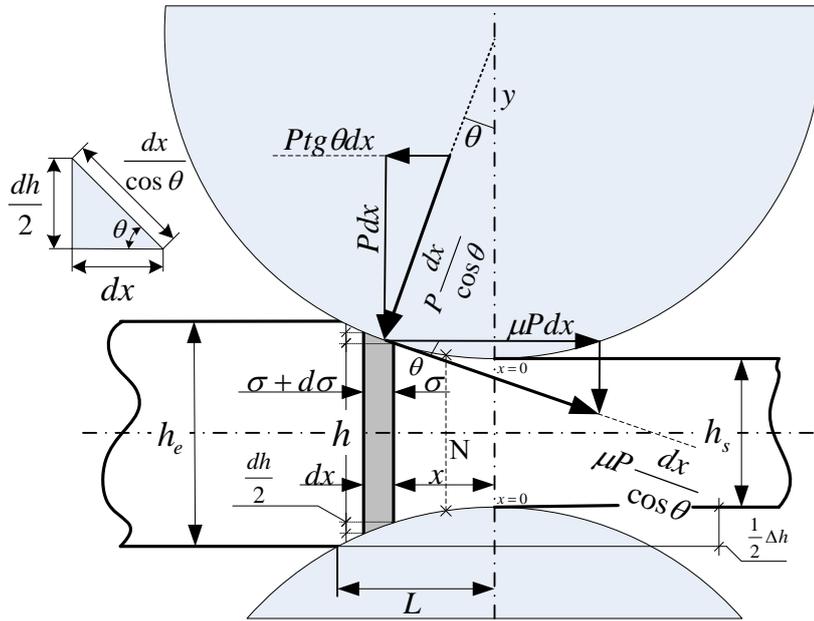


Figura 3.6: Diagrama de fuerzas durante el proceso de laminación.

nente horizontal de la misma, responsable en cierta manera del estirado de la banda, quedará $\mu P dx$.

Dichas fuerzas horizontales producen sobre las caras del elemento infinitesimal unas fuerzas de compresión, designadas $(\sigma + d\sigma)$ en la cara mayor $(h + dh)$ y (σ) en la cara menor (h) . Al resolver el equilibrio horizontal de fuerzas y asumiendo el trabajo de dos rodillos de laminación se obtiene:

$$2P \tan \theta dx \mp 2\mu P dx = (\sigma + d\sigma)(h + dh) - h\sigma \quad (3.2)$$

Destacar el signo variable (\mp), que hará referencia a la zona considerada en el cálculo respecto al punto neutro. Se supone que en el punto neutro la banda se mueve a la misma velocidad que el rodillo, desarrollándose un punto de no deslizamiento. Por lo tanto y debido al propio proceso de reducción la banda irá más lenta que el rodillo en la zona desde la entrada al punto neutro y más rápida desde el punto neutro hasta la salida. Esto significa que las fuerzas de rozamiento antes y después del punto neutro tendrán sentidos opuestos, generando el cambio de signo antes referido.

Agrupando términos en (3.2) se obtiene:

$$P(\tan \theta \mp \mu) = \frac{d(\frac{h\sigma}{2})}{dx} \quad (3.3)$$

donde el signo de la ecuación dependerá de estar tomando la sección elemental a un lado o al otro del eje neutro de la mordida. Por otro lado y debido a consideraciones geométricas $\frac{1}{2} \frac{dh}{dx} = \tan \theta$. La ecuación quedará:

$$P \left(\frac{1}{2} \frac{dh}{dx} \mp \mu \right) = \frac{d(\frac{h\sigma}{2})}{dx} \quad (3.4)$$

Para la resolución de la ecuación diferencial es necesario expresar el término σ en función de P . El criterio de plastificación de Tresca describe la condición según la cual, un material dúctil, presentará fluencia en algún punto cuando el valor de la tensión cortante máxima alcance un valor límite correspondiente a la fluencia en un ensayo normalizado. Matemáticamente la ecuación (3.5a) relaciona las tensiones principales σ_1 y σ_3 en un punto dado con el límite elástico del material (σ_c). En un proceso de compresión como el de laminación las tensiones principales serán las fuerzas de compresión verticales por un lado (término $P(1 \pm \mu \tan \theta)$) y las tensiones horizontales por otro (σ). Sustituyendo se obtiene la ecuación (3.5b):

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_c}{2} \quad (3.5a)$$

$$P(1 \pm \mu \tan \theta) = \sigma_c + \sigma \quad (3.5b)$$

Además y como se menciona con anterioridad, ya que los ángulos de entrada son muy pequeños el término $\mu \tan \theta$ es despreciable quedando $P = \sigma_c + \sigma$. Sustituyendo en (3.4) resulta finalmente la expresión (3.6), piedra angular de las teorías clásicas de laminación, que relaciona los parámetros más importantes en la laminación con los términos P y x , variables a resolver.

$$\frac{P}{2} \frac{dh}{dx} \mp P\mu = \frac{d(\frac{h}{2}(P - \sigma_c))}{dx} \quad (3.6)$$

Smith en [95] evoluciona el modelo anterior de tal manera que en vez de asumir un radio constante de laminación propone un arco parabólico de contacto entre banda y rodillo (supone por tanto cierta deformación del rodillo), ver figura 3.7, cuya expresión viene dada en (3.7). Esta descripción analítica del arco de mordida debe ser introducida en la ecuación (3.4) para

su posterior resolución.

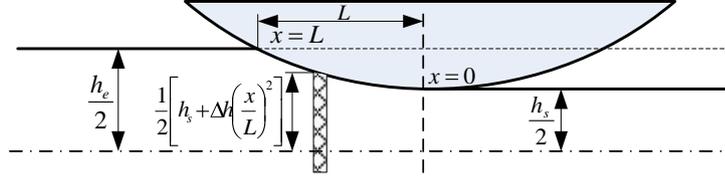


Figura 3.7: Geometría considerada teniendo en cuenta la deformación del rodillo en el modelo de Smith.

$$\frac{h}{2} = \frac{1}{2} \left[h_s + \Delta h \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right] \quad (3.7)$$

Sustituyendo la ecuación (3.7) y su derivada sobre la expresión anterior (3.6) y tras la reordenación de términos, resultará la ecuación (3.8):

$$\frac{d\left(\frac{P}{\sigma_c}\right)}{d\left(\frac{x}{L}\right)} = \frac{\frac{2\Delta h}{h_2} \left(\frac{x}{L} \mp \frac{PL\mu}{\sigma_c \Delta h} \right)}{1 + \frac{\Delta h x^2}{h_2 L^2}} \quad (3.8)$$

Este tipo de modelos es de compleja resolución, más aún si se considera la época de su formulación, sin apenas ningún tipo de ayuda computerizada. Los primeros intentos de resolución fueron a través de herramientas gráficas, calculando punto a punto la expresión obtenida. Mediante este mecanismo Trinks en [91], sobre el trabajo de Smith, obtuvo una serie de curvas, ver figura 3.8, que relacionaban la presión ejercida durante la laminación con otros factores como espesor de entrada, límite elástico del material, ángulo de mordida, ...

Modificaciones a la ecuación de Von Karman

Desde el modelo de Von Karman varios autores comenzaron a asumir ciertas simplificaciones que permitieron integrar y resolver más fácilmente la ecuación de distribución de presiones. En esta línea Tselikov [92] propone un modelo donde supone que el ángulo de mordida θ_i es constante e igual a la mitad del ángulo de entrada de la banda. Cabe resaltar que la asunción de Tselikov es válida solo para ángulos de contacto pequeños, tradicionales en la laminación de bandas muy finas. Así el autor partiendo de (3.2) alcanza la

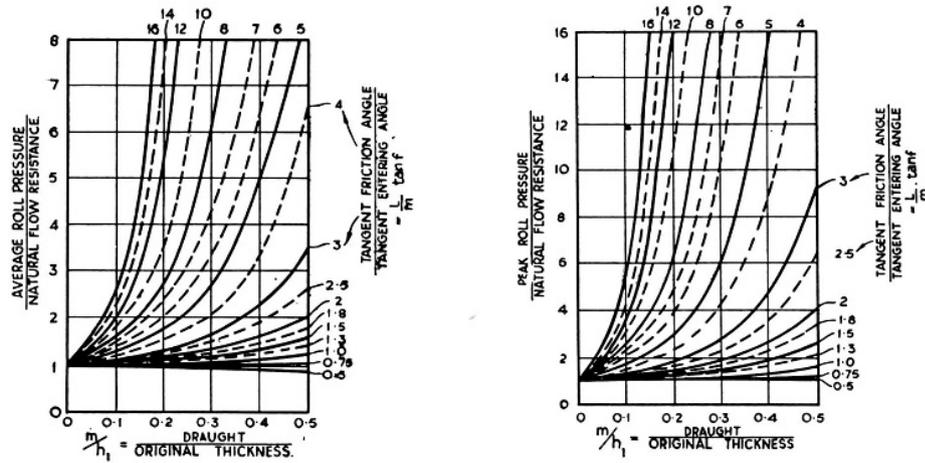


Figura 3.8: Curvas de Trinks para la resolución gráfica del modelo basado en Von Karman. [87]

ecuación fundamental de distribución de presiones (3.9)², donde los términos ξ y S_1 son constantes.

$$P^- = \frac{S_1}{1 + \xi} \left[\left\{ \frac{P_e}{S_1} (1 + \xi) - 1 \right\} \left(\frac{h_e}{h} \right)^{1+\xi} + 1 \right] \quad (3.9a)$$

$$\xi = \frac{\tan(\tan^{-1} \mu - \theta)}{\tan \theta} \quad (3.9b)$$

$$S_1 = \frac{\sigma_c}{1 + \mu \tan \theta} \quad (3.9c)$$

Posteriormente el autor lleva a cabo la integración de estas expresiones (3.10) para el cálculo de la fuerza específica necesaria para el proceso de laminación. Así obtiene expresiones algebraicas simples (sin términos diferenciales) para un cálculo de diversos parámetros críticos como la fuerza de la laminación o la ubicación del punto neutro del proceso. Con la resolución de estas ecuaciones Tselikov confeccionó una serie de diagramas, ver figura 3.9, ilustrando el efecto de diferentes valores de coeficientes de fricción (μ), reducción de espesor y diámetro de rodillos, en la distribución de presiones (esta forma de distribución de presiones se conoce como *friction-hill*).

²Ecuación correspondiente al área entre el plano de entrada y el punto neutro (P^-).

$$F = \int_0^L P(1 \mp \mu \tan \theta) dx \quad (3.10)$$

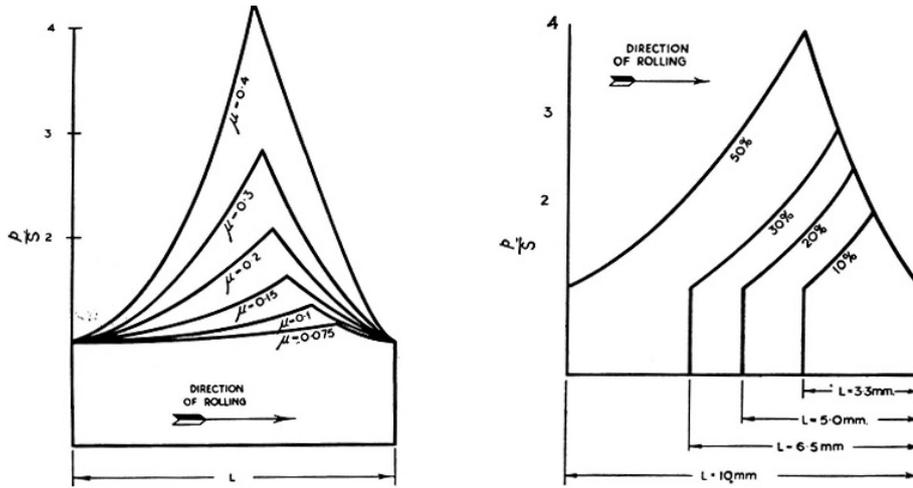


Figura 3.9: Distribución de presiones según Tselikov para diferentes valores de μ y porcentajes de reducción.

Nadai [71] basándose en Von Karman lleva a cabo una evolución bastante interesante del modelo. En primer lugar introduce el concepto de tensiones externas sobre la banda, aumentando así la aplicabilidad del modelo sobre el proceso de laminación en frío. Con este factor adicional el criterio de Tresca podrá escribirse como $P - (-\sigma) = \sigma_c$, donde las dos fuerzas principales serán la presión de laminación (P) y la tensión externa (σ), que deberán ser capaces de superar el límite elástico del material (σ_c) para llevar a cabo una deformación de la banda. Además el autor asume la existencia de ángulos lo suficientemente pequeños tal que permiten $\tan \theta = \theta = \frac{x}{R}$. Combinando todas las simplificaciones anteriores sobre la ecuación básica de laminación (3.3), el autor formula la ecuación (3.11):

$$(1 + z^2) \frac{dy}{dz} - \left(\frac{2}{\gamma \sigma_c} \right) \tau = 2z \quad (3.11a)$$

$$y = \frac{P}{\sigma_c} \quad (3.11b)$$

$$\gamma^2 = \frac{2h_2}{D} \quad (3.11c)$$

$$z = \frac{2x}{\sigma R} \quad (3.11d)$$

en este planteamiento es sin duda el termino relacionado con la tensión tangencial (τ), propio de las fuerzas de rozamiento, una de las mayores aportaciones del autor. En su trabajo define tres posibles modos de fricción, resolviendo la ecuación para dichos estados. Los modos considerados fueron:

- **Coefficiente de fricción constante.** Asume un valor de fricción constante a lo largo de todo el área de mordida. El autor calcula el efecto de las tensiones de entrada y salida sobre la distribución de presiones, aportando una visión sobre su relación con la posición del punto neutro y la fuerza de laminación. En la figura 3.10 se observa el efecto de las tensiones de entrada/salida sobre la distribución de presiones para una reducción y rozamiento constante dados.

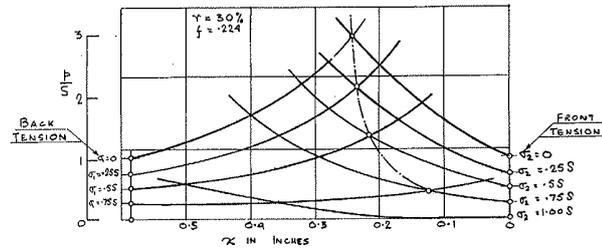


Figura 3.10: Distribución de presiones según Nadai en el caso de rozamiento constante según diferentes valores de tensión entrada/salida.[87]

- **Tensión tangencial constante.** Se consideran las tensión tangencial de rozamiento constante ($\tau = \tau_0$). Esta expresión vuelve a generar un perfil de presiones similar a los hasta ahora descritos (*friction-hill*).
- **Superficie de fricción proporcional a la velocidad de deslizamiento.** Es sin duda ésta una de las mayores aportaciones de Nadai, al ser el primer intento de tener en cuenta la naturaleza variable de la superficie de fricción en el área de mordida. De acuerdo a Nadai la tensión tangencial es una función de la viscosidad del elemento lubricante (η), el espesor de la película de éste (δ) y la velocidad relativa entre banda y rodillos. La tensión tangencial debida al rozamiento quedará (3.12):

$$\tau = \frac{\eta(V_{banda} - V_R)}{\delta} \quad (3.12)$$

Sin embargo este estado ya no genera el pico característico de la distribución de presiones sino que reemplaza esta por una sola curva más

suave. Además este punto neutro ya no coincide con la posición de máxima presión. En la figura 3.11 se compara el perfil de presiones de los dos últimos casos. Nótese el cambio de forma así como la ubicación del punto neutro.

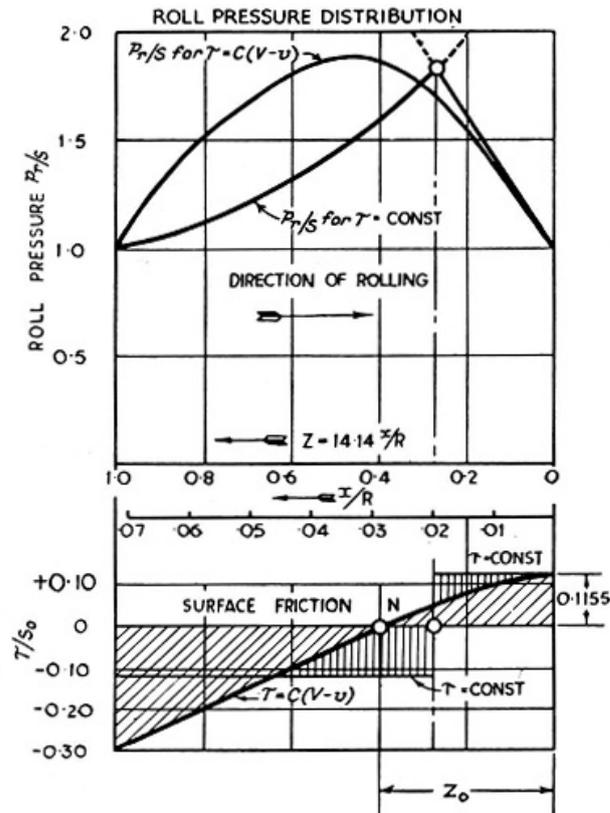


Figura 3.11: Distribución de presiones según Nadai para el caso de tensión de cortadura constante (curva tipo *friction-hill*) y para un régimen de lubricación variable.[87].

Los mayores inconvenientes de los modelos anteriores residen en las simplificaciones tomadas. En primer lugar parece probado que secciones verticales planas no se mantienen planas tras la laminación. Además la velocidad de reducción afecta al límite elástico del material, especialmente en la laminación en caliente. Obviamente el rozamiento está muy lejos de permanecer constante, siendo éste uno de los puntos más críticos. Por último parece necesario ser cautelosos con las simplificaciones sobre ángulos pequeños (4° - 5°), recomendadas en trenes de dos o cuatro cajas en materiales finos, pero no en el caso de laminación en frío en trenes tándem con diámetros de rodillos pequeños.

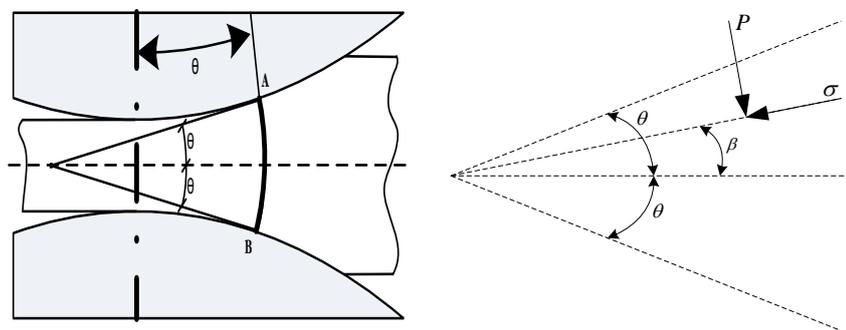
El completo modelo de Orowan

Uno de los estudios más completos llevados a cabo sobre la laminación es el desarrollado por Orowan [73]. Su teoría evita la mayoría de las aproximaciones y simplificaciones que se habían venido tomando hasta ahora, permitiendo cualquier variación en los términos de límite elástico y rozamiento dentro del arco de mordida. Además la asunción de deslizamiento de la banda en todo el arco de mordida excepto en el punto neutro se abandona, formulando a su vez un criterio que diferencia las áreas con deslizamiento de aquellas que no. Incluso añade factores para tener en cuenta la deformación propia de los rodillos de laminación. Destacar que esta teoría puede ser utilizada tanto para la laminación en frío como en caliente.

Pero principalmente esta teoría tiene en cuenta el problema de la falta de homogeneidad en la deformación, lo que conlleva abandonar la idea de que secciones planas se mantienen planas durante la laminación, ver figura 3.4. Orowan se apoya en los trabajos sobre compresión plana de Prandtl [81] (compresión mediante planos paralelos) y Nadai [70] (compresión mediante planos ligeramente inclinados) para desarrollar expresiones que ajusten mejor la distribución de tensiones en este tipo de casos. Mediante la adopción de los resultados de Nadai sobre compresión plana, Orowan define para un punto de una sección cilíndrica (ver figura 3.12(a)) a un ángulo β de la línea central del material (ver figura 3.12(b)), el estado tensional de dicho punto como (3.13). Resaltar que estos trabajos se concibieron para un contacto estático entre piezas, mientras que el autor lo supone aplicable para el caso de deslizamiento. Además estas expresiones consideran flujo en dirección al vértice, mientras que el autor las generaliza también para flujo en sentido contrario.

$$\sigma = P - \sigma_c \sqrt{1 - \left(\frac{2\mu P}{\sigma_c}\right)^2 \left(\frac{\beta}{\theta}\right)^2} \quad (3.13)$$

Con la distribución de tensiones definida, Orowan toma secciones cilíndricas (ver figura 3.12(a)) para el desarrollo de su modelo, abandonando así la idea de que secciones planas permanecen planas después de laminación. En (3.14) se muestra la ecuación diferencial resultante para un caso con deslizamiento (se obvia el caso de contacto estático), donde además de los términos habituales aparece el diámetro (D) de los rodillos y el ancho de la banda (w).



(a) Secciones cilíndricas elementales para el cálculo del modelo. (b) Compresión mediante planos no paralelos.

Figura 3.12: Asunciones del modelo de Orowan.

$$\frac{dF}{d\theta} = P \frac{D}{h} (\sin \theta \pm \mu \cos \theta) + D\sigma_c w (\sin \theta \pm \mu \cos \theta) \quad (3.14)$$

Sin embargo el completo modelo de Orowan tiene serios inconvenientes que lo han alejado de una utilización masiva. En general su resolución conlleva una labor tediosa y compleja. La obtención de la distribución de presiones, fuerzas y pares de laminación se convierte en un proceso largo y difícilmente asumible para una aplicación práctica. De hecho el autor solo llevó a cabo dos grupos de cálculos para la comparación con otros estudios, de carácter experimental, de la época. Además y a pesar del esfuerzo en la aproximación a la distribución de presiones en el área de contacto, parece que ésta aún no es completamente representativa de las verdaderas condiciones en la mordida. De cualquier manera el autor pasa por haber presentado la más completa y exacta de las teorías generales de laminación.

La formulación del modelo de Orowan abona la creación de muchos otros que tratan de conjugar fidelidad al proceso real con una menor dificultad operacional. Bland y Ford [6] establece sin duda uno de los más utilizados a nivel práctico. Formula una ecuación de equilibrio (3.15) basada en la de Orowan pero sustituyendo el diámetro del rodillo por el radio modificado de Hitchcock (R_m) y la tensión tangencial (τ) por el término clásico de rozamiento dependiente de la fuerza normal o radial en ese punto (μP). Además y para el cálculo de la tensión principal acude al caso clásico de compresión plana con planos paralelos.

$$\frac{dF}{d\theta} = 2PR_m(\sin \theta \pm \mu \cos \theta) \quad (3.15)$$

Este modelo genera una distribución de presiones tipo *friction-hill*, donde se puede distinguir dos zonas bien diferenciadas (limitadas por el punto neutro) con un sentido opuesto de las fuerzas de rozamiento. En (3.16a) se anota la expresión que define la distribución de presiones en la zona del punto neutro al plano de salida (P^+), donde (σ_c) hace referencia al valor del límite elástico en las diferentes zonas de la mordida y h al valor del espesor en cada punto del área de mordida. De la misma manera el autor propone una simple ecuación algebraica para el cálculo del ángulo neutro.

$$P^+ = \frac{\sigma_c h}{h_s} \left(1 - \frac{\sigma_s}{\sigma_{c_s}}\right) e^{\mu H} \quad (3.16a)$$

$$H = 2\sqrt{\frac{R_m}{h_s}} \arctan \left(\sqrt{\frac{R_m}{h_s}} \theta \right) \quad (3.16b)$$

La fuerza específica total ejercida (F) resultará de la integración del producto de esa presión radial por el radio del rodillo (3.17a). Para simplificar Bland y Ford asumen el límite elástico del material (σ_c) como una media del valor a lo largo del área de mordida (3.17b).

$$F = R_m \bar{\sigma}_c \left[\int_0^{\theta_N} \frac{h}{h_s} e^{\mu H} d\theta + \int_{\theta_N}^{\theta_i} \frac{h}{h_e} e^{\mu(H_i - H)} d\theta \right] \quad (3.17a)$$

$$\bar{\sigma}_c = \frac{\int_0^{\theta_i} \sigma_c d\theta}{\theta_i} \quad (3.17b)$$

Basado parcialmente en el trabajo anterior de Orowan está el de Sims [8]. Destacar que la teoría de Sims sirve como base para los compendios de datos publicado por el B.I.S.R.A. (*British Iron and Steel Research Association*) que hasta hoy día son utilizados como base para el cálculo de cargas en los procesos de laminación de productos planos. En comparación con Orowan, Sims asume la simplificación de ángulos de contacto pequeños ($\sin \theta = \tan \theta = \theta$). Toma la ecuación de éste para el caso de contacto estático y supone deformación plana con planos inclinados además de un valor constante del límite elástico del material a lo largo de todo el área de mordida (similar al cálculo de (3.17b)). El autor, siguiendo el mismo mecanismo que todos los anteriores, desarrolla una expresión diferencial para el cálculo de la distribución

de presiones en el área de mordida. Posteriormente resuelve el mismo en dos expresiones diferenciadas según la zona elegida (anterior o posterior al punto neutro). A continuación integra esta distribución de presiones para alcanzar una expresión de la fuerza total de laminación, suponiendo que para ángulos pequeños la presión radial es igual a la vertical. Tras este proceso de integración el autor define una expresión (3.18) para la fuerza específica de laminación (F). En la misma aparece el término $\bar{\sigma}_c \sqrt{R_m \Delta h}$ que es una de las aproximaciones más simples al cálculo de la fuerza de laminación, que propone como fuerza a ejercer el límite elástico del material ($\bar{\sigma}_c$) por una estimación básica de la longitud efectiva de laminación ($\sqrt{R_m \Delta h}$). Cabe destacar que esta aproximación es recurrente en muchos mecanismos simplificados de cálculo. Por otro lado el término Q_p es un factor dependiente del radio del rodillo, el espesor de salida y la reducción, que materializa la contribución de las fuerzas de fricción y de la inhomogeneidad en la deformación (consultar [87]). Bland y Ford llevaron a cabo pruebas experimentales sobre el modelo de Sims, alcanzando una diferencia entre ambos modelos de en torno a un 2%.

$$F = \bar{\sigma}_c \sqrt{R_m \Delta h} \cdot Q_p \left(\frac{R_m}{h_s}, r \right) \quad (3.18)$$

Otro trabajo interesante fue el de Jortner [52] donde resolvía el comportamiento de la laminación a través de la interacción de dos modelos por separado. Por un lado trata el problema de la deformación de los rodillos de trabajo, generando un modelo que describe la deformación de dos cilindros que soportan un par de presiones P diametralmente opuestas y concentradas en una pequeña área. Por otro lado y a través de la teoría de Orowan, Jortner considera la existencia de varias zonas bien diferenciadas donde el material pasa de un comportamiento elástico a otro plástico, ver figura 3.13, generando las expresiones apropiadas según consideremos una u otra región. Para la resolución del modelo el autor ajusta los resultados de ambos submodelos mediante un proceso iterativo de tal manera que coincidan una serie de condiciones de contorno. Así, y partiendo de una situación en la que los rodillos son perfectamente circulares y con una deformación uniforme de la banda, se alcanza una solución de compromiso de ambos modelos. Los resultados logran una gran exactitud comparados con modelos de otros autores, si bien los cálculos son prolongados en el tiempo y el factor de tensiones externas parece no estar bien modelado.

Destacar el modelo de Cosse y Economopoulos [13] de gran complejidad. Con un planteamiento similar al de Jortner, las simplificaciones son reducidas

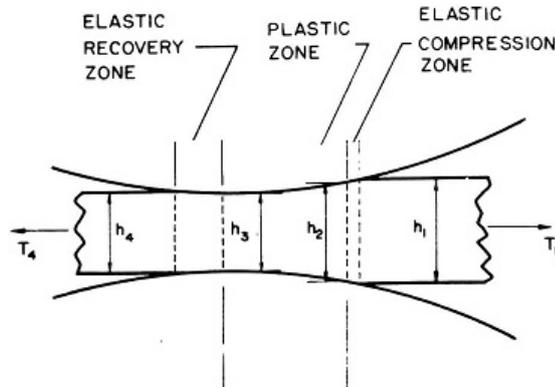


Figura 3.13: Zonas de deformación elástico-plásticas según Jortner.[87]

al mínimo teniendo en cuenta el comportamiento elástico y los cambios en las propiedades mecánicas que experimenta el material derivados de múltiples aspectos (velocidad de deformación por ejemplo). Al igual que el modelo de Jortner se trata de un proceso iterativo que trata de relacionar las complejas ecuaciones de deformación de la banda con las del rodillo. Una de las características más importantes de este trabajo es la posibilidad de existencia de dos puntos neutros en caso de laminaciones muy finas (puntos donde la velocidad relativa entre banda y material es cero).

Modelos computacionalmente eficientes

Los modelos anteriores tienen un gran valor conceptual pero son de limitada aplicabilidad por su complejidad. En este sentido varios autores proponen abandonar el método clásico de cálculo mediante la integración de la curva de distribución de presiones, para adoptar un mecanismo de cálculo directo mediante expresiones aritméticas más simples. Ekelund [28] en 1927, propone la ecuación (3.19) para el cálculo de la fuerza específica de laminación, teniendo en cuenta $\bar{\sigma}_c$ como el límite elástico medio, R_m como el diámetro deformado del rodillo, μ el coeficiente de rozamiento y los términos h_e y h_s los espesores iniciales y finales.

$$F = \bar{\sigma}_c \sqrt{R_m \Delta h} \left(1 + \frac{1,6\mu \sqrt{R_m \Delta h} - 1,2\Delta h}{h_e + h_s} \right) \quad (3.19)$$

Esta simple ecuación genera buenas aproximaciones a los resultados reales dentro de un elevado rango de condiciones de laminación (tipos de material,

carga, ...), con un coste operativo mínimo. El autor contempla además la adición de nuevos términos para corregir aspectos específicos del proceso de laminación.

Bland y Ford [6] proponen una expresión simple para la fuerza de laminación sin considerar fuerzas de rozamiento (3.20a). Los autores proponen introducir el efecto del rozamiento a través del término f_3 , dependiente de la reducción (r) y del parámetro a (3.20b). El valor de la función f_3 se puede obtener de manera gráfica [87] mientras que el término $\bar{\sigma}_c$ se calcula como se indica en (3.17b). De nuevo se plantea un proceso iterativo ya que la deformación del rodillo según Hitchcock es función de la fuerza específica de laminación, siendo necesario ajustar ambos términos. Sims [8] por un lado y Lianis y Ford [61] por otro desarrollaron métodos gráficos para la resolución de estos cálculos.

$$F = \bar{\sigma}_c \sqrt{R_m \Delta h} \quad (3.20a)$$

$$a = \mu \sqrt{\frac{R_m}{h_s}} \quad (3.20b)$$

$$F = \bar{\sigma}_c \sqrt{R_m \Delta h} \cdot f_3(a, r) \quad (3.20c)$$

Existen técnicas que aportan un enfoque distinto al problema de la estimación de la fuerza y par de laminado, llevando a cabo lo que se podría llamar un mecanismo basado en datos. Básicamente consiste en llevar a cabo una serie de laminaciones con unos parámetros bien determinados (reducción, tipos de material, ...), que serán utilizados como patrones para un proceso posterior de comparación e interpolación. Cook y Parker[12] proponen laminaciones en condiciones muy controladas de una serie de bobinas patrón y en una única caja de laminación. Con los datos tomados construyen una serie de curvas con los valores de fuerza necesarios según las diferentes condiciones de laminación (reducción, espesor inicial y diámetro de rodillos, ...). Estas gráficas se utilizan como base para el cálculo de la fuerza de laminación para otras combinaciones diferentes. Para su uso en instalaciones de varias cajas los autores enfocan el proceso como un reparto de la energía total necesaria entre las diferentes cajas de la instalación. Esta metodología ha generado muy buenos resultados en situaciones donde la laminación está altamente controlada (gran homogeneidad de espesores de entrada, de calidad y de tamaño de los rodillos).

Técnica muy similar es la de Davies [94] donde se calcula la presión media de laminación como cociente entre la fuerza y el área de contacto (asumiendo no deformación en los rodillos), para un material dado y bajo un amplio rango de reducciones y espesores de entrada. Los resultados se plasman también en una serie de curvas, ver figura 3.14, utilizadas para el cálculo posterior de otras situaciones de laminación. Aunque similar, este método aboga por el cálculo *in situ* en la propia instalación no como el anterior, teniendo su utilidad cuando sólo se dispone como equipamiento de propio sistema de laminación y las posibilidades de control y estudio del proceso son limitadas.

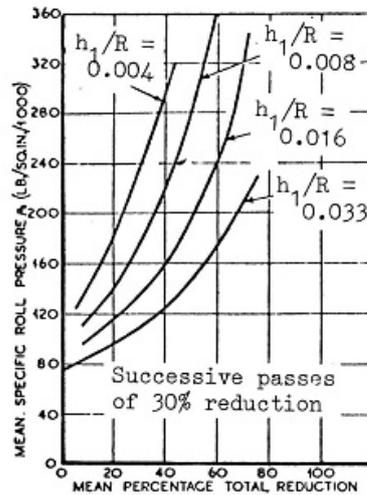


Figura 3.14: Gráficas del método de Davies con el producto de la presión específica entre el radio de los rodillos para varios valores de reducción en un tipo de acero.[87]

Para completar esta pequeña descripción de los modelos de laminación desarrollados a lo largo del tiempo, es necesario nombrar algunos de los intentos de Roberts. Hasta ahora se habían presentado modelos donde o bien se asumía una distribución de presiones de la forma *friction-hill* o bien una más suave (típico de un carácter del rozamiento variable). Este autor presenta uno de los modelos más simples donde supone una distribución de presiones uniforme a lo largo del área de mordida [85], ver figura 3.15. El cálculo de la fuerza específica de laminación (F) se lleva a cabo como el producto del límite elástico (σ_c) por una longitud efectiva de contacto (3.21a). Dicha longitud efectiva (L_e) será la suma de la longitud de contacto si el rodillo fuera perfectamente rígido (l_p), más la longitud si tenemos en cuenta la deformación elástica del mismo pero en ausencia de fricción (l_E), más la deformación del mismo teniendo en cuenta rozamiento entre banda y bobina (l_F). En la expresión (3.21c) se desarrollan estos términos, donde α es el inverso de la

reducción.

$$F = \sigma_c L_e \quad (3.21a)$$

$$L_e = l_p + l_E + l_F \quad (3.21b)$$

$$L_e = \sqrt{R\Delta h} + \alpha \sqrt{\frac{2FR}{E}} + \frac{\alpha^2 \mu R F (2-r)}{E h_e (1-r)} \quad (3.21c)$$

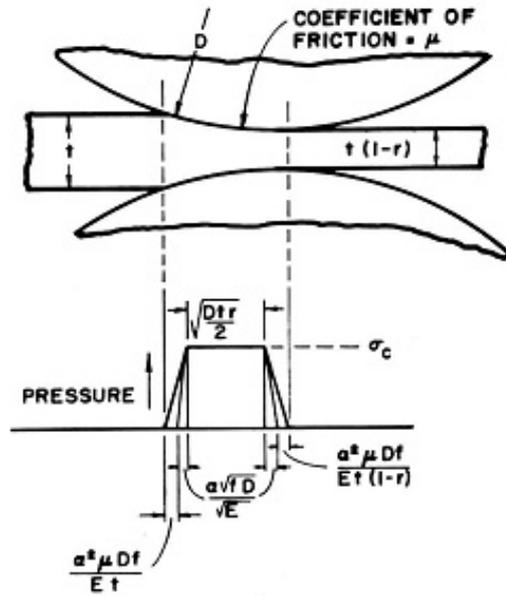


Figura 3.15: Distribución de presiones constante según Roberts y las 3 longitudes efectivas.[87].

Además el autor modela el término σ_c con la expresión (3.22) donde el primer término parte del límite elástico para un valor de reducción $\frac{r}{2}$, es decir una reducción media, mientras que el segundo término introducirá el estado tensional externo.

$$\sigma_c = 1,155\sigma_{c_{r/2}} - \left(\frac{\sigma_e + \sigma_s(1-r)}{(2-r)} \right) \quad (3.22)$$

El mismo autor asume de nuevo una distribución de presiones tipo *friction-hill* en [86] a la vez que abandona algunas simplificaciones sobre la longitud efectiva del área de laminado o del cálculo del estado tensional del material.

3.1.3. Modelos de carácter dinámico

Los modelos físicos presentados hasta ahora están orientados al cálculo estático de magnitudes de laminación, es decir, relacionan todas las variables del proceso para un instante dado. Este tipo de modelos, además de su indiscutible valor conceptual, son de gran utilidad para el diseño de la instalación y para el establecimiento de las condiciones iniciales del proceso (valores de *setup* o *presets*). Sin embargo pueden no resultar muy útiles (por su complejidad sobre todo) si se pretende el estudio dinámico del proceso, es decir, tratar de describir el comportamiento de los parámetros de laminación ante pequeñas variaciones en las variables del proceso [45].

Hessenberg propone uno de los primeros modelos de este tipo [46][44]. Éste y prácticamente la totalidad de este tipo de modelos se apoyan sobre la ecuación de continuidad aplicada al flujo de material entre cajas. Dado que en ningún momento se retiene material entre cajas se cumplirá la ecuación (3.23), donde el producto de velocidad (V) y espesor (h) del material será constante para cualquier caja e igual al cociente entre flujo de material (U) y ancho del mismo (B).

$$V_1 h_1 = V_2 h_2 = \dots = V_n h_n = \frac{U}{B} \quad (3.23)$$

Se pueden expresar los cambios sobre el punto de funcionamiento dado como (3.24a), donde según Hessenberg para pequeñas desviaciones (3.24b).

$$(V_1 + \Delta V_1)(h_1 + \Delta h_1) = \dots = (V_n + \Delta V_n)(h_n + \Delta h_n) = \frac{U + \Delta U}{B} \quad (3.24a)$$

$$\left[\frac{\Delta V_1}{V_1} + \frac{\Delta h_1}{h_1} \right] = \left[\frac{\Delta V_2}{V_2} + \frac{\Delta h_2}{h_2} \right] = \dots = \left[\frac{\Delta V_n}{V_n} + \frac{\Delta h_n}{h_n} \right] = \frac{\Delta U}{U} \quad (3.24b)$$

Es necesario por tanto el cálculo de la sensibilidad de los términos h y V ante perturbaciones y cambios en las variables fundamentales del proceso (3.25a) y (3.25b). Donde ΔD representa cualquier perturbación en una caja de laminación, pudiendo ser principalmente por cambios en el espesor de entrada (Δh_e) o por variaciones del *gap* (separación entre rodillos) (Δs).

$$\frac{\Delta h_s}{h_s} = \frac{1}{h_s} \left[\frac{\partial h_s}{\partial D} \Delta D + \frac{\partial h_s}{\partial \sigma_e} \Delta \sigma_e + \frac{\partial h_s}{\partial \sigma_s} \Delta \sigma_s + h_e \frac{\partial h_s}{\partial h_e} \frac{\Delta h_e}{h_e} \right] \quad (3.25a)$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{1}{V} \left[\frac{\partial V}{\partial D} \Delta D + \frac{\partial V}{\partial \sigma_e} \Delta \sigma_e + \frac{\partial V}{\partial \sigma_s} \Delta \sigma_s + h_s \frac{\partial V}{\partial h_s} \frac{\Delta h_s}{h_s} \right] \quad (3.25b)$$

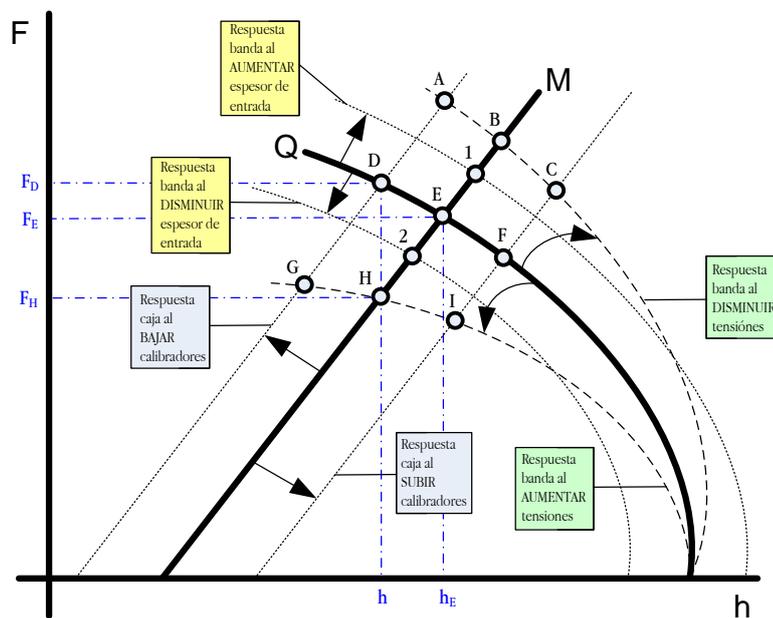


Figura 3.16: Efectos sobre el equilibrio caja-material de un proceso de laminado en frío debidos a la variación de las principales variables de control: tiro, separación rodillos y espesor de entrada.

En general los coeficientes que describen las variaciones de h y V tendrán que ser cuantificados correctamente, siendo ésta la máxima dificultad del proceso de cálculo. Para tal fin es necesario contar con modelos que relacionen las variables anteriores y así poder evaluar las derivadas parciales pertinentes. Por ejemplo, los coeficientes que relacionan las variaciones del espesor se extraen de la interacción entre la caja de laminación y el material laminado. Esta interacción es fácilmente explicable en la figura 3.16 donde se observan dos gráficas principales, la que representa el comportamiento de la caja de laminación (M) y la que describe al material siendo laminado (Q) para diferentes valores de fuerza de laminación (eje vertical, F) y espesor de salida (eje horizontal, h). La respuesta elástica del tren (M) se ve desplazada según

el cambio del entrehierro o abertura entre cilindros: desde la curva BEH inicial a la curva CFI al aumentar la separación o hasta la curva ADG al disminuirla. Por otro lado se observa el comportamiento de la banda (Q) al variar las tensiones de tiro de la misma: con un giro a la derecha (disminución de tensiones, nueva curva ABC) o uno a la izquierda (aumento de tensiones, nueva curva GHI). Otro factor importante para las variaciones del espesor final son las irregularidades en el propio espesor a la entrada de la caja laminadora. Este fenómeno afecta a la curva plástica del material (Q) desplazándola a la derecha al aumentar el espesor de entrada (punto 1) o a la izquierda si disminuye este (punto 2).

Este tipo de gráficos son utilizados en la industria como elementos de ayuda para la toma de decisiones por parte del personal encargado del control de la instalación. De esta manera, si desde unas condiciones estables (F_E y h_E) definidas por las curvas DEF y BEH se pretende pasar a un espesor más bajo h , se podrán tomar dos alternativas: por un lado, disminuir la distancia entre cilindros desplazando M hasta definir la nueva curva ADG donde el punto D viene dado por un valor de fuerza de laminación F_D mayor que el anterior F_E y un espesor h menor; por otro lado la opción sería aumentar el tiro de la banda hasta que Q se desplace a la curva GHI y genere un nuevo punto de equilibrio H caracterizado por el menor espesor de salida h pero también por una menor fuerza de laminación F_H .

De la misma manera y para el resto de coeficientes será necesario contar con modelos similares de fuerza de laminación para la relación entre espesores y tensiones y modelos de par para las cuestiones relacionadas con la velocidad y el deslizamiento. Hessenberg y Sims desarrollan expresiones propias para estos cálculos y así, una vez desarrolladas las expresiones para una caja, extenderlas a cualquier combinación de cajas ampliando el número de ecuaciones del sistema. Desgraciadamente la complejidad de estos modelos crece con el aumento de cajas de laminación. Otro modelo interesante y quizás el más ampliamente utilizado es el publicado por Misaka en 1968 [66], muy cercano al modelo anterior de Hessenberg y Jenkins [45]. Misaka propone una serie de expresiones que tienen en cuenta las variaciones de diferentes parámetros (tensiones frontales y traseras, espesores de entrada, variaciones en la abertura de los cilindros, velocidad, límite elástico del material y rozamientos) y compone un sistema de ecuaciones para la resolución de las condiciones de funcionamiento de un tren de cinco cajas. El autor lleva a cabo una aplicación práctica del algoritmo y obtiene los valores de los coeficientes de variación de un tren real de laminación.

Por último mencionar la existencia de estudios orientados al desarrollo de modelos que evalúen los estados transitorios del proceso. Los modelos anteriores pretenden explicar los cambios de variables, pero no hacen especial referencia a la dinámica propia del cambio, a la velocidad de transición entre un estado y otro. En una laminación a alta velocidad este tipo de estudios es importante ya que la longitud de material afectado por el estado transitorio puede llegar a ser apreciable. Las características dinámicas en este caso, además de apoyarse en los factores anteriores, ceden especial protagonismo a la efectividad de los sistemas de lubricación y a las prestaciones de los propios sistemas de control. Dentro de este área destacar los trabajos de Arimura, Kamara y Saito [3] que con la ayuda de computadores especiales acoplados al sistema llevaron a cabo estudios a fin de mejorar el rendimiento de un AGC (*automatic gage control*). Trabajo similar fue llevado a cabo sobre un AGC de un tren con accionamientos hidráulicos y descrito por Watanabe y Takahashi en [104].

3.2. Vibración y calidad en los procesos de laminación

Este apartado trata de describir el fenómeno vibratorio que ocurre en los procesos de laminación en frío y su importante relación con la calidad del producto final [37]. Las vibraciones se producen en cualquier tipo de máquinas durante su operación y en general no suelen causar daños importantes, ni a las mismas ni al producto manufacturado. Como norma general las vibraciones perjudiciales, capaces de alterar significativamente la posición de componentes críticos del sistema, están relacionadas con el concepto de frecuencia de resonancia.

Es necesario definir los términos oscilación forzada y modo resonante. Se denomina oscilación forzada al mecanismo más común de vibraciones. En éste existe una fuente clara que aporta la energía necesaria para la vibración del sistema. Desde el giro de un motor, un muelle, ..., hay un elemento o sistema cíclico que alimenta la vibración de la estructura final, en este caso la amplitud de la misma viene dado por la rigidez y masa del conjunto. En el caso de que el periodo de vibración de un sistema alcance la denominada *frecuencia de resonancia* la amplitud de la misma se incrementa enormemente, siendo en general este estado muy peligroso para la propia integridad de la estructura.

Dentro de las vibraciones existe un tipo especial denominado *vibración autoexcitada*. Los sistemas autoexcitados comienzan a oscilar de manera espontánea incrementándose su amplitud hasta que algún efecto posterior limita su crecimiento. La fuerza que alimenta este movimiento surge de las características propias de flexibilidad del cuerpo y de su frecuencia natural o de resonancia. El ejemplo más famoso de este tipo de fenómenos fue el acontecido al famoso puente de *Tacoma Narrows*, figura 3.17, en 1940. En el mismo, el conjunto de rachas de viento y estructura produjeron la formación de una oscilación autoexcitada y la destrucción posterior de la estructura. No existió entonces una fuerza vibratoria externa, la energía en juego venía de la interacción viento-estructura misma, requiriendo solo una pequeña aportación inicial del viento para el comienzo de la oscilación.



Figura 3.17: Oscilación del puente de *Tacoma Narrows* producto de un movimiento autoexcitado.

Un sistema de laminación en frío es un mecanismo complejo donde interactúan muchos y diferentes subsistemas. En este sentido es habitual la aparición de vibraciones que se transmiten al resto del sistema. A pesar del gran número de frecuencias detectables, solo unas pocas son de remarcar, ora por la energía transportada ora por su peligrosidad. En general las vibraciones son perjudiciales bien para la calidad del producto procesado bien para la propia mecánica del tren. En la laminación en frío son responsables de irregularidades en el espesor final del producto laminado, de limitaciones en la velocidad de laminación y del desgaste excesivo de ciertos elementos del sistema (rodillos de apoyo, cojinetes, ...). Son de destacar los siguientes tipos de vibración:

- Vibraciones forzadas a bajas frecuencia.
- Vibración torsional.
- Modo de tercera octava (*chatter*).
- Modo de quinta octava (*faceting*).

Sin duda la más perjudicial es la denominada de tercera octava por su mecanismo de actuación y efectos sobre la producción de material laminado.

3.2.1. Vibraciones forzadas a baja frecuencia

Éste es el tipo de vibración más simple que se puede encontrar y es común a cualquier tren. Se trata de una vibración forzada producida habitualmente por la excentricidad de los rodillos de laminación. Este tipo de oscilación es más baja que la frecuencia natural de la estructura, por tanto no es común que le afecte ningún tipo de fenómeno de resonancia. La amplitud del movimiento depende únicamente de la rigidez de la estructura y del material laminado. Este tipo de variaciones en la abertura entre cilindros son responsables de buena parte de las variaciones en el espesor final del producto laminado. Cojinetes, desacoplamientos, transmisiones y en general elementos mecánicos mal ajustados son los responsables de las mismas.

3.2.2. Vibración torsional

La vibración torsional implica variaciones cíclicas en la velocidad angular de los accionamientos eléctricos del tren. Este tipo de movimientos pueden producir irregularidades en la superficie de los elementos laminados e importantes variaciones de la abertura entre cilindros del castillete. La banda de frecuencias de este fenómeno se encuentra entre los 5 y 25 Hz.

En este tipo de vibración el eje del accionamiento actúa como un muelle de torsión, producto de un mal funcionamiento del sistema de control de los accionadores, de una lubricación deficiente en el área de mordida o de una vibración forzada en las unidades de potencia del conjunto. Algunos autores [67] incluso consideran las vibraciones torsionales como autoexcitadas cuando el coeficiente de rozamiento disminuye al aumentar la velocidad.

Los remedios contra este tipo de vibración pasan por resolver problemas en los accionamientos del sistema y en general eliminar cualquier fuente de vibración forzada, además de limitar la velocidad de laminación y el rango de espesores procesados a unos valores que no perjudiquen la continuidad de la capa de lubricación.

3.2.3. Modo de quinta octava

La vibración en quinta octava o *faceting*, es un modo de vibración en torno a 600-1200 Hz que produce marcas equiespaciadas sobre la banda entre 10 y 40 mm de distancia. En realidad este modo de vibración afecta especialmente a los rodillos de apoyo de la caja de laminación, formando unas perceptibles marcas paralelas al eje de los mismos, ver figura 3.18. Con el paso del tiempo estas bandas trasladan el defecto a la banda en laminación imprimiendo marcas sobre el material procesado.

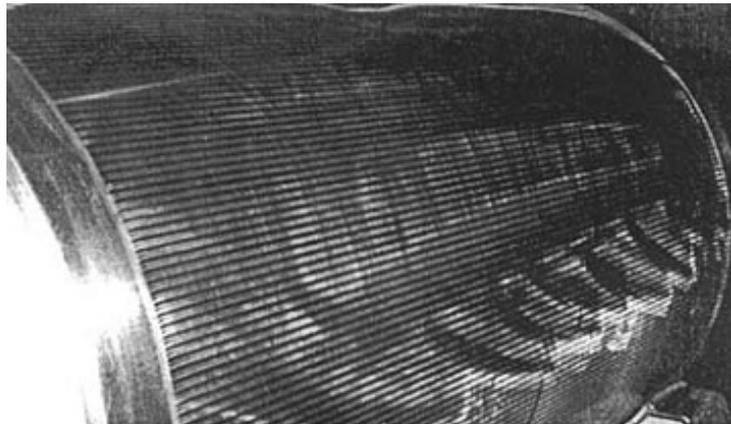


Figura 3.18: Marcas sobre rodillo de apoyo consecuencia de vibración en quinta octava [4].

Evitar este tipo de defectos obliga a una mayor frecuencia de cambio de los rodillos de apoyo a fin de evitar que se llegue a traspasar el defecto a la banda. Obviamente una mayor frecuencia en el cambio de los rodillos implica mayor número de paradas y menor horas de uso por rodillo, lo que redonda en una operación más costosa de la instalación. Estas vibraciones requieren de alguna fuente de vibración externa (vibración forzada), caso habitual son transmisiones mal ajustadas, problemas en los rodamientos y vibraciones de los accionamientos.

El estado de los rodamientos de los rodillos de apoyo es capital. Ciertos estudios [26] apuntan una clara relación entre el estado de los mismos y la aparición de vibraciones en quinta octava. Ligeros defectos en las ampuestas, ver figura 3.19, de los rodillos de apoyo, desencadenadas por golpes en las mismas durante los procesos de carga y descarga, están unidas a la aparición de problemas de vibración en periodos de tiempo relativamente cortos. Especial atención se ha de tener también en los procesos de rectificado de los cilindros: un mal acabado en los mismos puede convertirse en la fuente de vibración forzada necesaria para desencadenar la vibración. En este punto es clave disponer de elementos de control del rectificado que aseguren un ajuste fino del mismo.

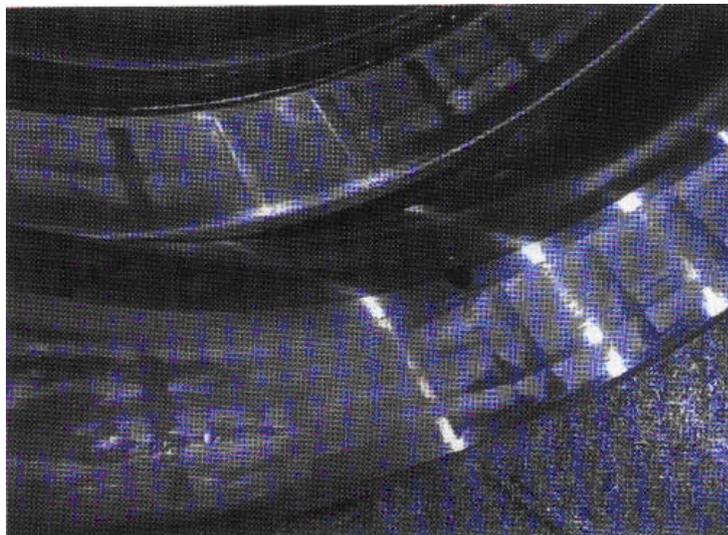


Figura 3.19: Ligeros defectos en ampuestas de rodillos producto del manejo del mismo y probable desencadenante de vibración en quinta octava.[26]

Los últimos estudios llevados a cabo apuntan a la excitación del armónico de quinta octava de la frecuencia natural de la caja de laminación como el desencadenante del problema [68][4]. Según éstos la entrada en resonancia de la caja lleva a un movimiento en fase de los rodillos de trabajo que golpean a los de apoyo formando las marcas características, ver figura 3.18. La solución consiste en evitar el nivel de velocidad que excita a la caja en su modo de resonancia natural, limitando la productividad de la instalación. Diversos trabajos [41] calculan niveles de velocidad críticos para según que condiciones de laminación, siendo una herramienta importante para el incremento de la fiabilidad de los rodillos de apoyo de la instalación.

De cualquier manera este tipo de defectología no es habitual dada la diferencia en la dinámica de formación entre vibraciones de tercera y quinta octava (mucho más lenta esta última), siendo sin duda la tercera octava la fuente de vibración a tener en cuenta.

3.2.4. Modo de tercera octava

La vibración en la tercera octava es sin duda la más perjudicial de cuantas puede experimentar un tren de laminación en frío. Este fenómeno puede producir significativas variaciones de espesor dentro de un rango de espesores nominales muy amplio, ver figura 3.20. Incluso si no se llevan a cabo acciones correctoras llega a desembocar en la misma rotura de la banda. Este tipo de problemas se tratan de paliar estableciendo unos estrictos límites de velocidad de trabajo en los sistemas de laminación. Sin embargo, para cierto tipo de materiales con unas características mecánicas especiales, este tipo de limitaciones afecta mucho a la productividad y a la rentabilidad del sistema mismo.

El problema se magnifica si se tiene en cuenta que la mayoría de los trenes de laminación en frío están formados por varias cajas en cascada. Cada una de las cajas mostrará su propio lazo de realimentación que a su vez relacionará su dinámica con las de las demás cajas. Si una caja aguas abajo comienza a vibrar, la caja aguas arriba observará variaciones en el tiro de salida, induciendo a la misma a entrar en vibración en el mismo modo. La misma caja aguas abajo producirá variaciones en el espesor de salida que contribuirán a amplificar la vibración en la siguiente caja.

Este tipo de vibración tiene esta particular denominación debido a que su banda de frecuencia se encuentra dentro de la denominada “tercera octava” en el argot musical (120-190 Hz), aunque a veces puede llegar a valores más altos (300 Hz). Se trata de una vibración autoexcitada que se acerca a la frecuencia natural de la estructura de laminación. Desgraciadamente la frecuencia de vibración es más alta que el ancho de banda de los sistemas de control del tren y por ello las irregularidades en el espesor final pasan desapercibidas para los mismos. Estos defectos en el espesor son muy uniformes y están en fase a lo largo del ancho de la banda. Solo un análisis delicado del producto final detectará este defecto. El fenómeno suele ocurrir a velocidades elevadas, siendo la reducción de la misma el único mecanismo útil para su eliminación. Su aparición es súbita, incrementándose la amplitud de la vibración rápidamente. Es una vibración audible con un sonido muy particular. De hecho, en equipos sin sistemas de detección es su característico sonido

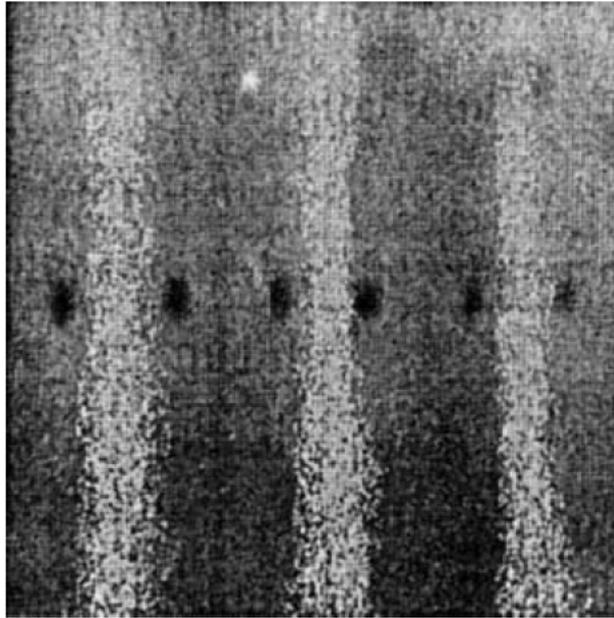


Figura 3.20: Aspecto de marcas sobre la banda debido a vibraciones en tercera octava.[114]

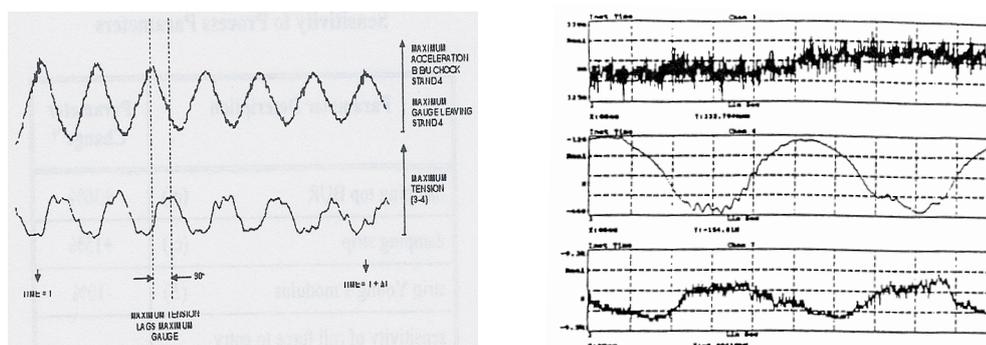
el que alerta a los operarios. Es habitual su expresión en trenes multicaja dentro de las dos últimas cajas de laminación, si bien trenes de una sola caja también experimentan este fenómeno.

Los primeros estudios remarcables sobre el fenómeno del *chatter* comienzan en la década de los ochenta ([107] en 1978). Tamiya [89] y Tlustý [90] desarrollan una teoría básica del *chatter* en laminación en frío donde explican su naturaleza y causas, sentando las bases de los estudios posteriores. La idea del *chatter* como una vibración autoexcitada se toma como cierta, e incluso se apunta al retraso en la fase de la tensión de la banda como posible causa del mismo. Ambos autores derivan un criterio de estabilidad y describen los efectos de varios parámetros del sistema en el límite de estabilidad.

Chefneux [10] lleva a cabo estudios del fenómeno pero bajo un criterio multicaja, tratando de tener en cuenta las interacciones entre cajas sucesivas. Define dos tipos: aquellas atrasadas donde la perturbación de una caja llega a la siguiente tras un tiempo de tránsito (típico de un defecto en el espesor que ha de recorrer la distancia intercaja antes de alcanzar la siguiente) y aquellas instantáneas donde la interacción se transmite de manera inmediata (las variaciones de tensión se transmiten de manera instantánea). Este autor confirma las ideas anteriores del *chatter* como vibración autoexcitada

con un origen en los cambios de tensión de la banda. Además establece la importancia de la configuración de la caja para la aparición del fenómeno y relaciona el mismo con una velocidad de laminación elevada. Pawelski en [75] presenta un modelo que describe la estabilidad del sistema a través de las reacciones de todas las cajas que componen el sistema de laminación cuando se introduce una perturbación en alguna de ellas.

Los estudios llevados a cabo por Paton y Critchley [74] confirman la existencia de un desfase de 90° entre la abertura de cilindros, o *gap* (supuesta ésta igual al espesor de la banda a la salida de la caja) y las oscilaciones en la tensión de entrada de la banda (ver figura 3.21(a)). Esta importante apreciación es confirmada también por Yun en [110] donde además se compara con la fase de la fuerza de laminación, denotando un desfase en este caso fuerza-tensión de 180° , ver figura 3.21(b).



(a) Relación entre la vibración (aceleración ampuesta rodillo de apoyo) y la tensión de entrada durante un episodio de *chatter*. [74]

(b) Variación del *gap*, la tensión de entrada y la fuerza de laminación. [110]

Figura 3.21: Desfases encontrados entre las diversas señales fundamentales de fuerza, tensión y espesor.

Mención especial merece Yun y la gran cantidad de trabajos al respecto. Destacar la serie [112][110][111], donde a través de un modelo simple de laminación construye una teoría sobre las causas y formación del *chatter*. Los trabajos más modernos sobre el *chatter* ahondan en la complejidad de los modelos (de la caja y del proceso de laminación). De esta manera Yun en [113] califica de cuasiestáticos los modelos anteriores al no tener éstos en cuenta la dinámica de variación del *gap*. Con este criterio construye un modelo donde se tiene en cuenta la derivada respecto al tiempo de la abertura de rodillos. A partir de aquí aparecen más autores que con esta misma idea van añadiendo mayor complejidad al modelado del proceso de laminación.

Kimura en [54] lleva a cabo un planteamiento similar respecto a la dinámica del *gap* incluyendo una aproximación parabólica al área de mordida. Incluso Hu en [50] establece un modelo donde el movimiento del *gap* se lleva a cabo en dos direcciones perpendiculares, teniendo en cuenta en su modelo la dinámica de ambos movimientos. De todas maneras algunos autores [64] comentan que la dinámica del área de mordida pueden considerarse muy lenta en comparación con el periodo de oscilación de un fenómeno de *chatter* y por tanto pueden obviarse y considerar el proceso de laminación cuasiestático.

La caja de laminación también es motivo de estudio por parte de varios autores, desde modelos simples como [111] a otros más complejos [54] o [11], donde se presenta una dinámica de seis masas en movimiento. Obviamente la complejidad del modelo de caja elegido depende de los aspectos a estudiar y de la capacidad de modelado. Así para trenes experimentales es posible obtener expresiones específicas de rigidez y amortiguamiento de cada uno de sus componentes mecánicos.

Meehan [64] elabora interesantes trabajos sobre el *chatter*. El enfoque de este autor afirma que el fenómeno del *chatter* es ocasionado por una situación de amortiguamiento negativo. Según éste, en algunas ocasiones la interacción entre fuerza y tensión produce un amortiguamiento negativo que puede llegar a anular el propio, de signo positivo, del conjunto de elementos que forman el tren, provocando entonces la aparición del fenómeno del *chatter*. Para el autor la respuesta de la tensión ante cambios en el *gap* se asemeja a un sistema de primer orden con una determinada constante de tiempo (τ). Si dicha constante es suficientemente grande el sistema será capaz de amortiguar estas variaciones, en cambio si se reduce esta constante las fluctuaciones de tensión comenzarán a afectar al sistema aportando amortiguamiento negativo y reduciendo el margen de estabilidad. El mayor problema estriba en que la constante de tiempo es inversamente proporcional a la velocidad de laminado, responsable de episodios de *chatter* a altas velocidades.

3.2.5. Criterios de velocidad crítica

Varios son los autores que mencionan la estabilidad del proceso de laminación ante el *chatter* y que incluso plantean algunos experimentos para ilustrar estos conceptos [105]. La mayoría de éstos se quedan en la observación de algún parámetro fundamental y su influencia en la estabilidad. Sin embargo existen algunos pocos trabajos donde se enuncian y desarrollan criterios de manera analítica, dando así lugar a expresiones de aplicación

inmediata. Entre estos cabe destacar a Farley [30] con un criterio simple y fácil de aplicar en (3.26), donde ζ corresponde al término de amortiguamiento del sistema total y ω_n corresponde a la frecuencia natural del sistema.

$$V_{s_{crit}} = \frac{-2LM\zeta\omega_n^3}{\frac{dF}{d\sigma_e}Ew} \quad (3.26)$$

Kimura en [54], por otro lado, define para un conjunto multicaja un índice de estabilidad con la particularidad de ser independiente de la configuración del tren, es decir, dependiente solo de las condiciones de laminación. La respuesta de la fuerza de la banda ante desplazamientos verticales se asemeja a la de un conjunto masa-muelle ($K_b = \frac{\Delta F}{\Delta s}$) pero con un ligero retraso (T_d). Añadiendo este comportamiento al modelo clásico de una caja de laminación, muelle más amortiguador (B_m), es posible enunciar la condición de inestabilidad (3.27a) mediante la evaluación del coeficiente de amortiguamiento resultante del sistema total. El autor define un índice Q (3.27b) donde evalúa el segundo término de (3.27a) y que será claro indicador de la estabilidad del proceso (si el índice crece el sistema tiende a ser inestable).

$$B_m - K_b T_d < 0 \quad (3.27a)$$

$$Q = K_b T_d = \left| \frac{\Delta F}{\Delta s} \right| T_d \quad (3.27b)$$

Como se menciona antes, Meehan [64] propone un criterio de estabilidad algo más complejo, (3.28a), donde condensa un buen número de parámetros físicos en una expresión de dos elementos. El primero (3.28b) es una medida del acoplamiento dinámico entre el proceso de deformación y el propio conjunto laminador, donde ω_n es la frecuencia natural de la caja y τ hace referencia al retardo en la respuesta de la tensión ante variaciones de la velocidad de entrada. El parámetro (3.28c) será el amortiguamiento efectivo, fruto de la diferencia entre el del sistema mecánico total (ζ) y el amortiguamiento negativo generado por las fluctuaciones de tensión (mencionar el término K_w como el coeficiente elástico del contacto banda y rodillo).

$$V_{s_{crit}}/V_e = a(b \pm \sqrt{b^2 - 1}), \quad b \geq 1 \quad (3.28a)$$

$$a = \omega_n \tau \quad (3.28b)$$

$$b = \frac{-w(\partial P/\partial \sigma_s)[1 + h_e(\partial f/\partial h_e)_i/f_i]}{2h_e M \omega_n^2 \zeta \beta (1 + w(\partial P/\partial h_e)/K_w)} - \zeta \quad (3.28c)$$

Por último, en [105] y a través de un cuidado planteamiento, se lleva a cabo un análisis de estabilidad de ciertos parámetros (reducción, coeficiente de rozamiento y velocidad de laminado) aunque no se plantea un mecanismo claro de cálculo como en [64].

3.2.6. Estrategias de eliminación del *chatter*

En la actualidad existen mecanismos funcionales para la detección y eliminación del *chatter*. En la figura 3.22 se observan los bloques funcionales de este tipo de sistemas. Un conjunto de acelerómetros convenientemente situados en las cajas a monitorizar (las últimas son las más proclives a experimentar *chatter*) miden las vibraciones acaecidas durante la operación de la línea. Tras un preprocesado básico, una etapa de filtrado toma el contenido de la señal de vibración correspondiente a la banda del *chatter*. Tras una etapa de conversión, un sistema calcula la energía contenida en la banda del *chatter*. Una posterior comparación con un valor límite (umbral) predefinido activará la alarma de aparición del *chatter* a lo que viene seguido de una reducción inmediata y profunda de la velocidad de laminación a fin de paliar el fenómeno. Se tiene por lo tanto un sistema que: por un lado detecta el fenómeno una vez que ya se ha manifestado (*a posteriori*) y por tanto algunos de los efectos negativos del *chatter* ya se han dejado sentir (errores de espesor, riesgo de rotura, ...); y por otro lado reduce la velocidad de laminación bruscamente como única herramienta para eliminar la vibración. Cabe destacar que esta reducción de velocidad es tomada en exceso, es decir, no se tiene constancia de ningún valor de velocidad límite que trate de minimizar esta reducción del régimen de laminación. Al contrario, la consigna de reducción es siempre la misma y está basada en criterios muy conservadores de seguridad. De cualquier manera, este tipo de sistemas es el único disponible comercialmente y se encuentra instalado en varias líneas industriales por todo el mundo.

Para algunos autores una correcta explotación de este tipo de sistemas puede permitir aumentar la velocidad media de laminación al delimitar con el paso del tiempo las fronteras de velocidad. Chefneux por ejemplo menciona en [10] mejoras importantes de la productividad y la velocidad media de laminación, en un periodo de tiempo de tres años, con el uso de un sistema similar. Otro sistema similar se presenta en [2]. En [40] se discute la mejor

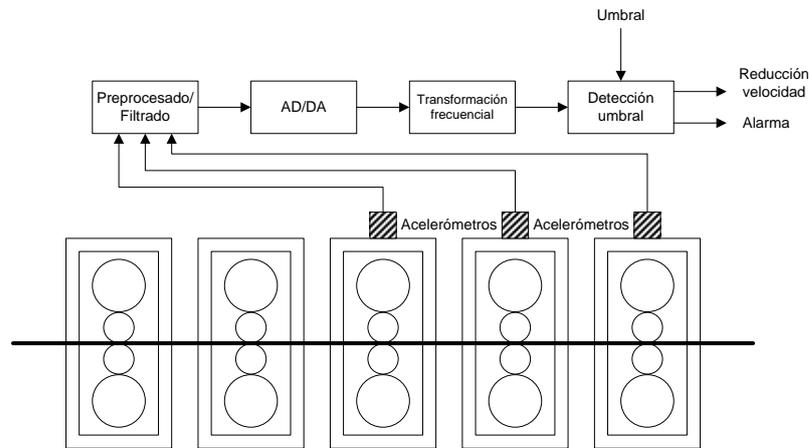


Figura 3.22: Diagrama de bloques de un sistema detector de *chatter* típico.

localización de los acelerómetros, concluyendo que ésta será las ampuesas de los rodillos de trabajo. Sin embargo esta disposición es compleja por el número de sensores y el mantenimiento de las conexiones de los mismos. De todas maneras la instalación de este tipo de sensores en las cajas de laminación presenta un buen rendimiento en la actualidad gracias a los avances en este tipo de elementos.

Sin embargo, a lo largo del tiempo varios autores han propuesto estrategias de diferente naturaleza para la reducción del *chatter*. La base de todas ellas es aumentar la característica de amortiguamiento del sistema. Un trabajo interesante en esta línea es el de Critchley y Paton [14]. Estos consideran primero la idea de incidir directamente sobre la causa del *chatter*, las fluctuaciones de tensión, considerando el desarrollo de un control “blando” de tensión, de tal manera que las variaciones de ésta puedan ser minimizadas. De cualquier manera, esta idea se desecha, por la posible influencia sobre el resto de sistemas de control operativos en la instalación. Estos autores llevan a cabo pruebas de funcionamiento con elementos amortiguadores especiales instalados en puntos críticos. Estos amortiguadores son diseñados especialmente para absorber la energía de la banda de tercera octava en las ampuesas de los rodillos de apoyo. Al parecer el uso de este tipo de elementos permitieron elevar en un 15% la velocidad media de laminado en una serie de bobinas laminadas sin *chatter*. Desgraciadamente existen múltiples limitaciones a este tipo de estrategias que la hacen impracticable según el autor. Una alternativa prometedora está en el control del rozamiento de las ampuesas contra la estructura del castillete, un incremento de la fricción puede ayudar a aumentar el amortiguamiento del sistema. Algunos intentos aislados con esta técnica

arrojaron aumentos de hasta 125 mpm en la velocidad de laminación. Sin embargo, el uso de estos elementos rozantes puede aumentar la histéresis en el movimiento de los rodillos y degradar la calidad del espesor final alcanzado.

Por último nombrar, una técnica muy avanzada utilizada en el mundo aeronáutico para reducir otro tipo de vibraciones autoexcitadas (flameo): el amortiguamiento activo. Conceptualmente es muy simple; se requiere un sistema sensor de vibraciones que realimente con una señal de amplitud y fase determinada al sistema de tal manera que aumente el amortiguamiento general del sistema. Sin embargo aparecen muchos interrogantes en la aplicación de esta idea a un tren de laminación en frío: en que punto ha de inyectarse dicha señal al sistema, la selección de actuadores con los requerimientos de potencia y ancho de banda necesarios (en caso de existir), ... Sin embargo y a pesar de todo lo anterior, parece claro que la mejor manera de luchar contra el *chatter* se encuentra en los etapas iniciales de construcción de la instalación con la adopción de determinados criterios de diseño.

En general los trabajos sobre el *chatter* poseen un planteamiento teórico importante, muchas veces orientado a una mayor complejidad del propio modelo de laminación [50], junto con el resultado de simulaciones que, en el mejor de los casos, toman sus puntos de funcionamiento de situaciones más o menos reales. Algunos acompañan el trabajo con observaciones sobre datos reales, si bien cabe diferenciar la procedencia de estos datos reales de los denominados trenes experimentales (con grandes posibilidades en cuanto a ensayo de diversos parámetros pero con una clara limitación respecto a una instalación industrial) o de trenes industriales reales (incluso en estas colecciones de datos merece la pena diferenciar entre productos laminados en campañas diseñadas para tal experimento o dentro de la operativo habitual de la línea). Son los menos los que se atreven a enunciar criterios de estabilidad numéricos de fácil aplicación y muy escasos la aplicación de estos criterios sobre datos reales a gran escala. Kimura por ejemplo en [54] lleva a cabo una serie de simulaciones numéricas a fin de caracterizar correctamente el fenómeno del *chatter*. Posteriormente compara ciertas apreciaciones con un conjunto de datos reales para después enunciar su índice de estabilidad, el cual es comprobado en un par de puntos de funcionamiento similares a las condiciones reales. El extenso trabajo de Yun por ejemplo lleva a cabo diversas observaciones sobre el comportamiento de ciertas variables en un tren de laminación experimental a nivel de laboratorio [110]. Esta instalación consta de una sola caja de laminación a escala de la que podría ser un tren real, con un amplio margen de configuración. El mismo autor [111] lleva a cabo un estudio de la estabilidad del sistema basando sus conclusiones en

experimentos llevados a cabo sobre simulaciones. Camino similar sigue Chen [11], planteando un aparato teórico apoyado sobre simulaciones para concluir con una breve observación de ciertos aspectos del fenómeno basado en datos reales. El trabajo de Meehan [64] utiliza, en una primera etapa, un simulador computerizado del proceso de laminación para derivar toda su teoría sobre el *chatter*. Posteriormente, y sobre una instalación real, llevó a cabo una serie de apreciaciones en un reducido cuerpo de bobinas durante al menos dos semanas. Por último aplica su criterio sobre velocidad crítica a unos pocos casos reales. En el otro extremo quizás se encuentra Petit en [78] donde su trabajo encuentra utilidad por el número de observaciones sobre datos reales, si bien adolece de un planteamiento teórico claro.

De cualquier manera los estudios sobre el *chatter* y su interés aún siguen vigentes hoy día tras casi 30 años de publicaciones. Yang en [105] (año 2010) presenta un elegante modelo en espacio de estados del proceso de laminación para posteriores estudios del *chatter* y su estabilidad.

Capítulo 4

El modelado y la supervisión de procesos complejos

4.1. Los sistemas de supervisión

El mantenimiento predictivo es un paradigma dentro de la industria actual. La posibilidad de observar el inicio y desarrollo de situaciones anómalas es una necesidad demandada por los operadores de las líneas de fabricación actuales. Dentro de este ámbito existen varias técnicas que pueden ser utilizadas para la detección de fallos o, en general, la caracterización de nuevos puntos de funcionamiento de un proceso. Sin embargo estas labores albergan una gran complejidad conceptual y técnica.

El termino FDI (*Fault detection and isolation*) se refiere al problema de detección y caracterización de las situaciones de fallo. La variedad de mecanismos que forman los sistemas FDI y la heterogeneidad de aplicaciones hacen muy difícil una clasificación simple de los mismos. La estructura funcional de un sistema FDI responde habitualmente al mismo esquema, ver figura 4.1. Según Isermann [51] existirá algún tipo de modelo cuya labor estriba en la evaluación de un conjunto de entradas a fin de lograr una estimación de un conjunto de salidas. A continuación ambas salidas (las estimadas y las reales del sistema monitorizado) son comparadas para obtener los residuos (diferencias). En una última etapa algún tipo de sistema de decisión se encargará de tomar los residuos para una posterior evaluación y diagnóstico del proceso.

Los sistemas de diagnóstico más simples están basados en el establecimiento de una serie de niveles críticos (umbrales) para cada una de las variables importantes del proceso. En estos casos el modelo es solamente una

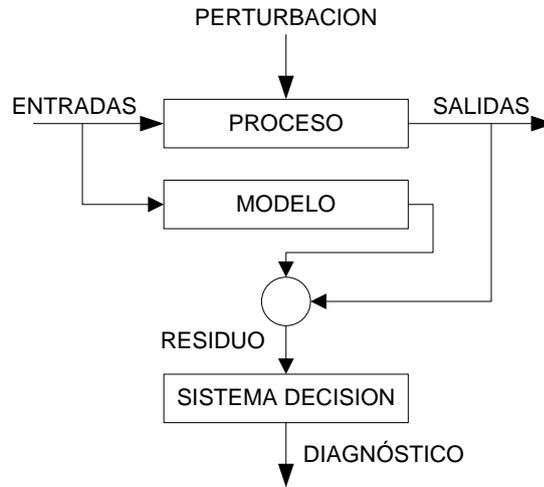


Figura 4.1: Bloques funcionales de un sistema FDI.

constante, muchas veces definida a través de la experiencia de los encargados de la planta, de tal manera que las alarmas son activadas en el caso de exceder dicho valor. A pesar del carácter simplista de este concepto, cabe recordar que este tipo de sistemas FDI es ampliamente utilizado, especialmente en la supervisión de maquinas rotativas eléctricas. Sin embargo cuando el número de variables a analizar es elevado, la dificultad para extraer conclusiones se incrementa, convirtiendo el proceso de aislamiento del fallo en una tarea muy compleja.

Otro grupo importante de sistemas FDI son aquellos basados en modelos analíticos. En este tipo de sistemas las salidas reales del sistema son comparadas con otras calculadas a través de un modelo basado en ecuaciones explícitas. Obviamente el rendimiento de este tipo de sistemas dependen en gran medida de la calidad del ajuste del modelo sobre el proceso real. Es habitual que en muchos procesos complejos no sea posible obtener un modelo, ya sea por no alcanzar un nivel de exactitud mínimos o por requerir tiempos de cálculo demasiado extensos para las necesidades de un proceso real.

Una tendencia interesante dentro de los sistemas FDI son aquellos cuyos modelos están basados en datos. En éstos, la definición del modelo se lleva a cabo obviando los mecanismos físicos y centrándose en las relaciones de los datos. El modelo es creado a través de un conjunto de datos reales tratando de recoger el mayor número de estados funcionales del proceso. Según [99] las diferentes maneras por las que puede extraerse conocimiento a través de históricos del proceso pueden verse esquematizados en la figura 4.2 donde se

establecen dos grandes familias: métodos cualitativos y cuantitativos.

Los métodos cualitativos persiguen tratar la información desde un punto de vista cualitativo, es decir, caracterizar los conjuntos de datos mediante características no numéricas. De estos métodos pueden mencionarse los sistemas expertos y el análisis cualitativo de tendencias (QTA). Un sistema experto es aquel cuyos resultados se apoyan sobre un sistema de decisión basado en reglas formulado por un conjunto de expertos. El sistema incluye etapas de adquisición de conocimiento, selección de representación del conocimiento, codificación del conocimiento en una base común, desarrollo de mecanismos de inferencia para el diagnóstico y diseño de un interfaz adecuado. De carácter muy especializado entre sus ventajas se encuentra la transparencia, la capacidad de decisión ante incertidumbre y la posibilidad de razonamiento de las decisiones tomadas. Existen numerosos trabajos que desarrollan los sistemas expertos como mecanismos de diagnóstico.

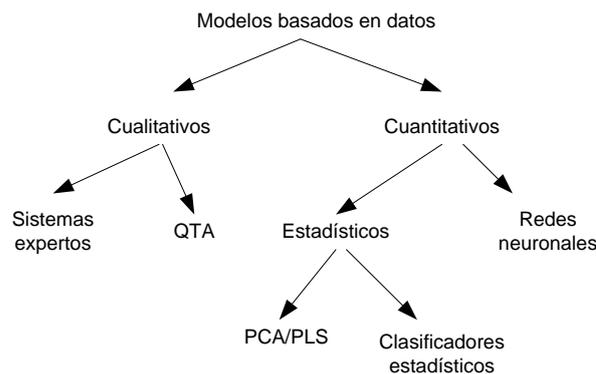


Figura 4.2: Clasificación de métodos basados en datos[99].

Otra particularidad de los métodos cualitativos es la abstracción de la información proveniente de un análisis de tendencias. En términos cualitativos, eventos similares (o distintos) arrojan tendencias similares (o distintas). Así el modelado de tendencias puede ser utilizado para identificar estados del proceso o incluso para predecir futuros fenómenos. Además un proceso de fallo suele arrojar una serie de tendencias diferentes a las habituales. En el análisis de tendencias es importante contar con una etapa de filtrado que elimine fluctuaciones momentáneas debido al ruido. Sin embargo este filtrado puede a su vez falsear la lectura de estas tendencias. Además es necesario cambiar los niveles de abstracción del análisis de las tendencias a través del uso de diferentes fondos de escala.

4.2. Técnicas de modelado cuantitativas

El otro segundo gran grupo de técnicas basadas en datos son los métodos cuantitativos, donde la información se codifica mediante valores numéricos. Los métodos cuantitativos plantean la tarea del diagnóstico como un problema de reconocimiento de patrones [99]. En éste, el objetivo final será la clasificación del fallo dentro de, en general, un grupo predefinido de clases. La aproximación estadística utiliza una distribución estadística conocida para llevar a cabo la clasificación. En las redes neuronales se ajustan una serie de parámetros del clasificador de tal manera que se amolde este a la realidad de los datos. Otro concepto fundamental en este tipo de técnicas es el de reducción de la dimensión, donde se trata de describir con precisión un conjunto de datos de entrada de dimensión p con otro subconjunto de dimensión n más pequeña ($n < p$). Muchas de las técnicas de este grupo llevan a cabo un proceso de este tipo como forma eficiente de extracción de conocimiento.

4.2.1. PCA, análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales (*Principal Component Analysis*, *PCA*) es una de las técnicas más habituales para abordar el problema de reducción de la dimensión. Los orígenes se encuentran en los ajustes ortogonales por mínimos cuadrados introducidos por Pearson. Su utilidad es doble [76]:

- Permite representar óptimamente en un espacio de dimensión pequeña observaciones de un espacio general p -dimensional. En este sentido, componentes principales es el primer paso para identificar las posibles variables *latentes*, o no observadas que generan los datos.
- Permite transformar las variables originales, en general correlacionadas, en nuevas variables incorrelacionadas, facilitando la interpretación de los datos.

El problema consiste en encontrar un subespacio de dimensión n menor que p tal que al proyectar sobre él un conjunto de N puntos p -dimensionales ($\mathbf{x}_k = [x_1, \dots, x_p]$), se conserve la estructura de éstos con la menor distorsión posible. Básicamente las componentes principales serán un conjunto de n variables y_i combinación lineal de las del espacio de entrada x_j , con la propiedad de tener varianza máxima y estar incorrelacionadas. Esta propiedad de poseer la varianza máxima es la responsable por la cuál a través de unas pocas componentes se condensa la mayor parte de la información del

conjunto de variables iniciales.

Sea \mathbf{S} la matriz de covarianzas muestrales:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (\mathbf{x}_k - \bar{\mathbf{x}})(\mathbf{x}_k - \bar{\mathbf{x}})^T \quad (4.1)$$

siendo $\bar{\mathbf{x}}$ un vector con la media de las observaciones. La matriz \mathbf{S} puede ser reducida a una matriz diagonal \mathbf{L} a través de una matriz \mathbf{U} tal que $\mathbf{S} = \mathbf{U}\mathbf{L}\mathbf{U}^T$. Las columnas de \mathbf{U} son los vectores principales, mientras que los elementos de \mathbf{L} , $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$ son los valores propios ordenados de la matriz de covarianzas \mathbf{S} que caracterizan la cantidad de variación en el conjunto de datos que explica cada una de las componentes principales.

El algoritmo PCA se fundamenta pues en el cambio de base del espacio de entrada en un espacio tal que tiene como base los vectores propios correspondientes a la matriz de covarianzas: $\mathbf{Y} = \mathbf{X}\mathbf{U}$. De manera equivalente es posible llevar a cabo la transformación inversa: $\mathbf{X} = \mathbf{Y}\mathbf{U}^T$ ¹.

Sin embargo y como se comenta anteriormente, el objetivo final del PCA consiste en reducir la dimensionalidad p del espacio de datos de entrada. Para ello a la hora de llevar a cabo la transformación anterior se tomarán solo algunas de las componentes principales de la matriz \mathbf{U} (n columnas de la matriz \mathbf{U}). La elección del número de componentes principales se lleva a cabo teniendo en cuenta el valor de los valores propios, \mathbf{L} . Obviamente cuantos menos vectores propios de la matriz se consideren, mayor puede ser la información del conjunto perdida y por tanto mayor el error cometido. El objetivo será reducir la dimensionalidad lo más posible sin perder información cualitativa sobre el contenido de los datos. De cualquier manera, con variables con una dependencia importante es frecuente que un pequeño número de nuevas variables (menos del 20 por 100 de las originales) expliquen la mayor parte (más del 80 por 100) de la variabilidad original.

A menudo se dispone de un grupo adicional de datos, \mathbf{T} , proveniente por ejemplo de variables relacionadas con la calidad. En cualquier proceso de monitorización será conveniente incluir la información de ambos grupos de datos de tal manera que sea posible utilizar el grupo de variables \mathbf{X} para predecir y detectar cambios en las variables de calidad \mathbf{T} . Esta acción puede

¹Mientras no se haga la reducción del número de columnas de \mathbf{U}

llevarse a cabo a través de la metodología PLS (*partial least square*), donde se modela la relación entre ambos grupos de datos a la vez que se comprimen. Esta técnica se utiliza para la extracción de variables latentes que no sólo expliquen la variación en los datos \mathbf{X} sino también las variaciones de \mathbf{X} que mejor predicen los datos de calidad \mathbf{T} [59].

4.2.2. Clasificadores estadísticos

La identificación de fallos puede entenderse como un problema de clasificación y por tanto puede encuadrarse dentro del grupo de clasificadores estadísticos clásicos, donde es necesario asignar un vector \mathbf{x} a una clase c de un conjunto \mathcal{C} de dimensión d . Se entiende el clasificador como una función γ que asigna clases a cada observación (4.2):

$$\gamma(\mathbf{x}_k) = c \quad c \in \mathcal{C} \quad (4.2)$$

Además existirá una matriz de coste $\Phi(c, j)$ donde se refleja el coste de clasificar en la clase c cuando realmente corresponde a la clase j . El objetivo es pues construir un clasificador que minimiza el coste total de los errores cometidos. Esto se consigue [27], por ejemplo, por medio del clasificador de Bayes (4.3):

$$\gamma(\mathbf{x}) = \arg \min_c \sum_{j=1}^d \Phi(c, j) p(j|\mathbf{x}) \quad (4.3)$$

donde la distribución de probabilidad conjunta es desconocida y puede ser estimada a partir de una muestra aleatoria simple $\{(\mathbf{x}_1, c_1), \dots, (\mathbf{x}_N, c_N)\}$ extraída de dicha función de distribución conjunta.

4.2.3. Redes neuronales

La confección de modelos basados en datos mediante redes neuronales es una tendencia cada vez mayor en el ámbito de los sistemas de diagnóstico. De manera tradicional las redes neuronales han sido utilizadas para resolver problemas de clasificación y regresión² con buen resultado. Las redes neuronales pueden clasificarse en base al tipo de sistema de aprendizaje: supervisado

²En adelante se englobarán ambas tareas en *clasificación*.

o no supervisado. Un algoritmo supervisado genera el clasificador a partir de un conjunto de muestras de entrada y su correspondiente clasificación de salida conocida. El método de aprendizaje supervisado más utilizado en el panorama de las redes neuronales han sido el de propagación hacia atrás (*backpropagation*). A través de una correcta elección de la topología de la red el problema se reduce a una estimación correcta de los pesos de la misma. Existen muchos trabajos sobre la aplicación de este tipo de técnicas en sistemas de diagnóstico. En [99] puede encontrarse una completa revisión de los mismos.

Los sistemas no supervisados llevan a cabo el proceso de clasificación sin ningún tipo de información de los *clusters*, o agrupaciones, del espacio de salida. El objetivo de estos métodos es el de agrupar conjuntos de datos con rasgos similares (proceso de *clusterización*). La medida de similitud es habitualmente una medida de distancia. En el momento que existe algún patrón alejado de los grupos existentes, se forma una nueva clase con dicho patrón como base. Sin duda el ejemplo más popular es el algoritmo *K-means* [27]. Este trabajo se centrará en un tipo de redes neuronales no supervisadas denominadas SOM (mapas topológicos auto-organizados).

4.2.4. SOM, mapas topológicos auto-organizados

El SOM es una potente herramienta para una visualización intuitiva de datos de muy alta dimensionalidad. Es capaz de convertir relaciones complejas entre variables en otras más simples que puedan ser plasmadas en representaciones visualizables.

Una de las características del SOM es la conservación de la topología [102], propiedad por la cual puntos cercanos en el espacio de salida corresponden a puntos vecinos en el espacio de entrada de mayor dimensión. La correspondencia de un conjunto de datos de elevada dimensión en un grupo de datos de mucha menor dimensionalidad, de manera ordenada, ayuda a manifestar *clusters* de datos del espacio de entrada y así observar sus relaciones. De esta manera una de las aplicaciones más importantes del SOM se encuentra en la visualización de procesos o sistemas complejos de alta dimensionalidad, permitiendo una abstracción sobre los datos de entrada iniciales para un análisis más intuitivo en un espacio de salida de menor dimensión.

Es por ello que el SOM encuentra una aplicación en el campo de la ingeniería de control y la visualización de procesos complejos [20][21], llevando a cabo una monitorización que de otra manera sería muy compleja de reali-

zar. El SOM también es utilizado para la identificación y predicción, ya sea en campos tan diversos como el reconocimiento de voz [58] o las finanzas [22].

Algoritmo.

El algoritmo del SOM puede ser descrito como una proyección no lineal, ordenada y suave de los datos de un espacio de entrada de alta dimensionalidad sobre un espacio de salida de menor dimensión[58].

El SOM es una red neuronal de aprendizaje no supervisado y de carácter competitivo [56]. El carácter competitivo proviene del mecanismo a través del cual las neuronas ajustan su actividad mediante un proceso de interacción mutua en un mecanismo de aprendizaje no supervisado.

Cuando se trata de desarrollar un SOM, entran en juego dos espacios, uno el de entrada de dimensión p , y otro de salida de menor dimensión n . El SOM trata de proyectar los datos del espacio de entrada en el espacio de salida, que habitualmente es fácilmente visualizable, pero guardando las relaciones topológicas que pudieran existir en el espacio de entrada.

Se dispondrá pues, en el espacio de entrada, de un conjunto de N puntos \mathbf{x}_k de dimensión p . Se trata de ajustar una superficie definida en el espacio de entrada por un conjunto de vectores $\mathbf{m}_j = [m_1, \dots, m_p]$, llamados vectores de codificación, sobre los puntos anteriores de tal manera que cada \mathbf{x}_k se asocie con el vector de codificación más próximo (\mathbf{m}_c) de acuerdo a una medida de distancia determinada $d(\cdot, \cdot)$. En la figura 4.3 se observa un ajuste del conjunto de vectores de codificación sobre una distribución esférica de puntos \mathbf{x}_k .

Mecanismo de entrenamiento.

Es por tanto necesario calcular una serie de vectores de codificación \mathbf{m}_j tal que se ajusten a la “*forma*” con la que están dispuestos los datos en el espacio de entrada. La solución clásica a este problema se basa en un proceso de optimización, a través del mecanismo de cuantificación vectorial (VQ) [36][38] que trata de ajustar el conjunto de vectores \mathbf{m}_j a la distribución de los datos de entrada. Para ello trata de minimizar el llamado *error de cuantificación promedio* (4.4) [58]:

$$E = \int f[d(\mathbf{x}, \mathbf{m}_c)]p(\mathbf{x})d\mathbf{x} \quad (4.4)$$

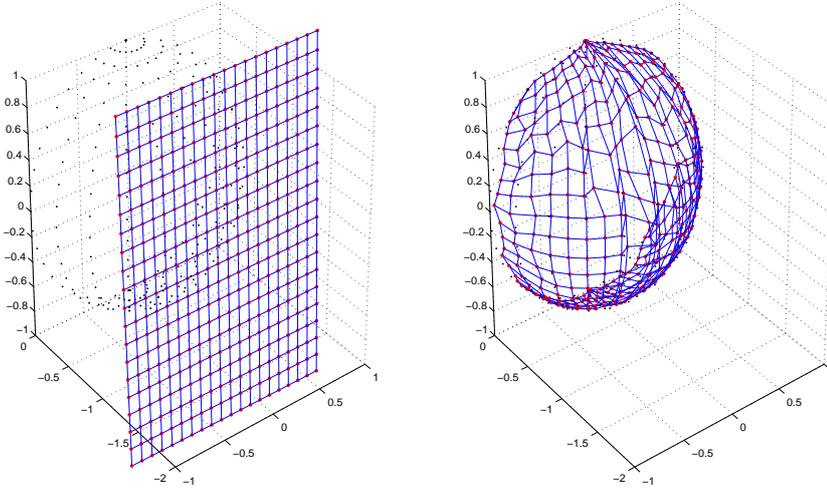


Figura 4.3: Superficie de vectores de codificación (malla azul) sobre conjunto de datos en disposición esférica (nube de puntos negra).

donde f es cierta función monótona creciente de la distancia $d(\cdot)$.

El conjunto de vectores \mathbf{m}_j que minimicen la ecuación (4.4) formarán una distribución de elementos que se ajusta al grupo de datos de entrada, alojándose más \mathbf{m}_j en regiones del espacio de entrada donde hay mayor densidad de datos. De cualquier manera esta proyección no es ordenada ya que datos próximos en el espacio de entrada no se corresponden, en general, con proyecciones próximas en el espacio de salida. La solución de esta función de coste no es sencilla, existiendo diversos algoritmos para su resolución. La resolución habitual pasa por la ejecución de algoritmos iterativos. Básicamente constan de dos fases bien diferenciadas:

- Una primera fase donde se selecciona el vector más “*semejante*” \mathbf{m}_c a un vector del espacio de entrada \mathbf{x}_k , donde:

$$c = \arg \min_j \|\mathbf{x}_k - \mathbf{m}_j\| \quad (4.5)$$

- Una segunda fase donde este vector “*ganador*” \mathbf{m}_c se modifica para aumentar su semejanza con \mathbf{x}_k .

En general la semejanza de ambos vectores se dictamina a través de la distancia euclídea, de tal manera que $\|\mathbf{x}_k - \mathbf{m}_j\|$ sea mínimo. La actualización del vector sería:

$$\mathbf{m}_c^{nuevo} = \mathbf{m}_c + \alpha(t)[\mathbf{x}_k - \mathbf{m}_c] \quad (4.6)$$

Este proceso se repite con todas las muestras de los datos de entrada \mathbf{x}_k y durante un cierto número de veces e (épocas). Durante este proceso el parámetro $\alpha(t)$ decrece monotonamente en el tiempo ($0 < \alpha(t) < 1$), hasta que finalmente el algoritmo converge.

Este método de entrenamiento es de carácter competitivo, si bien el aplicado al SOM va más allá al introducir mecanismos de interacción entre neuronas en la fase de modificación de la neurona ganadora (\mathbf{m}_c).

Como se define en [56] el algoritmo de entrenamiento del SOM incluye cierta *ordenación* en el conjunto \mathbf{m}_j . El algoritmo anterior genera una solución de la función de coste tal que una permutación en los vectores solución resulta en un mismo valor de dicha función. En el caso del SOM se define la ordenación a través de las unidades \mathbf{g}_j en un espacio de bajo dimensión, generalmente de dimensión uno o dos, llamado *espacio de salida o de visualización*. Dichas unidades se corresponden una a una con las unidades del conjunto \mathbf{m}_j a través de una alineación (en el caso 1D) o con la formación de una rejilla regular (en el caso 2D).

El SOM introduce entonces una nueva regla [57] en la actualización de los vectores \mathbf{m}_j , de tal manera que no sólo se modifica el vector \mathbf{m}_c ganador, sino además a todos aquellos vectores \mathbf{m}_j cuyos homólogos \mathbf{g}_j sean vecinos al homólogo \mathbf{g}_c del vector ganador \mathbf{m}_c :

$$\mathbf{m}_j^{nuevo} = \mathbf{m}_j + \alpha(t)[\mathbf{x}_k - \mathbf{m}_j] \quad j = \{i \mid d_g(\mathbf{g}_i, \mathbf{g}_c) \leq n_c(t)\} \quad (4.7)$$

donde $d_g(\cdot, \cdot)$ es la distancia definida en el espacio de visualización y $n_c(k)$ es una distancia decreciente con la iteración en curso. De esta manera se consigue una ordenación más general en las primeras épocas para ir pasando a modificaciones más finas en las últimas. En la figura 4.4 se observa la evolución de los vectores \mathbf{m}_j en un entrenamiento.

Una evolución de esta metodología consiste en actualizar todas las unidades y en mayor proporción las unidades más cercanas a la ganadora a través del uso de una función. La *vecindad gaussiana* se define como:

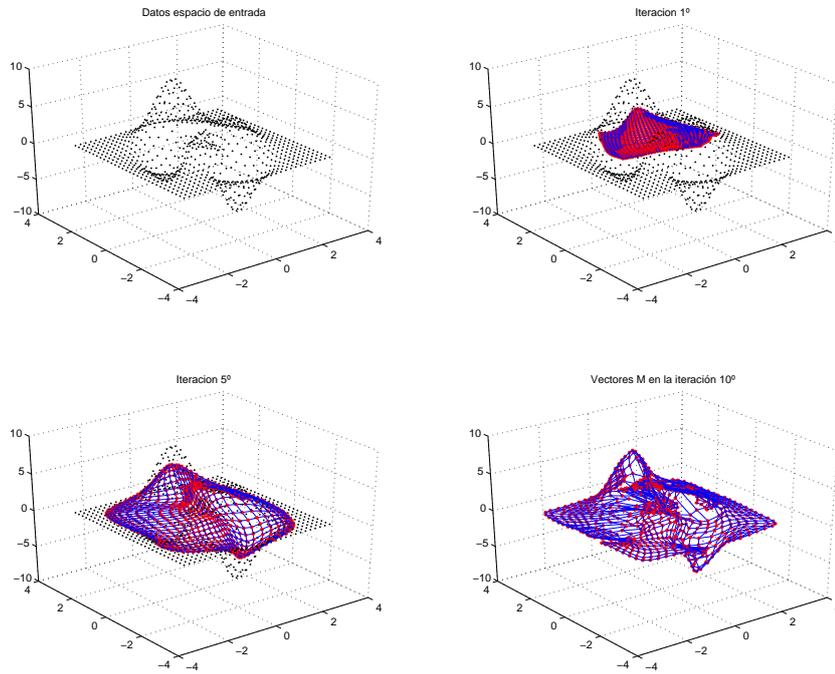


Figura 4.4: Evolución del entrenamiento de un SOM. El conjunto de vectores de codificación (puntos en rojo) se va ajustando a la forma de los datos de entrada (puntos negros).

$$h_{cj} = e^{-\frac{d_g(\mathbf{g}_j, \mathbf{g}_c)^2}{\sigma^2}} \quad (4.8)$$

donde la amplitud del campo receptivo viene dado por σ mientras que la intensidad decrece monotonamente en función de la distancia definida en la retícula.

$$\mathbf{m}_j^{nuevo} = \mathbf{m}_j + h_{cj}[\mathbf{x}_k - \mathbf{m}_j] \quad (4.9)$$

El entrenamiento con este tipo de vecindad hace que todas las neuronas del SOM se adapten, a través del valor de su distancia, en cada una de las épocas. Este factor mejora la organización de las mismas y hace que el aprendizaje se asemeje más a los procesos biológicos.

Proyección

Como se comenta con anterioridad una de las bondades del SOM es el permitir reducir la dimensión de los espacios de entrada. Para ello, una vez entrenado, se define una proyección no lineal (S) del espacio de entrada sobre el espacio de visualización. A cada punto \mathbf{x}_k de entrada se le asocia uno de los puntos de la retícula \mathbf{g}_j correspondiente al vector de codificación más cercano o unidad ganadora \mathbf{m}_c según (4.5), ver figura 4.5. Matemáticamente se define:

$$S(\mathbf{x}_k) = \mathbf{g}_c \quad (4.10)$$

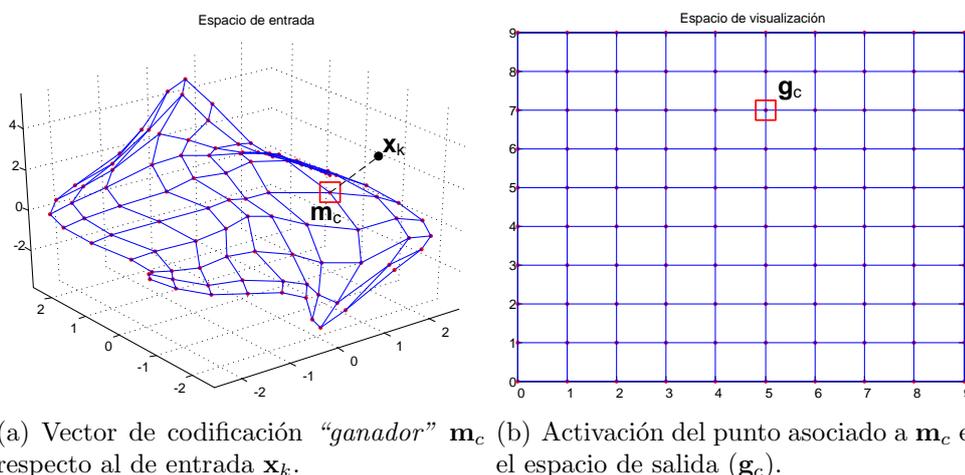


Figura 4.5: Proyección del espacio de entrada sobre el de visualización.

Características

- Los vectores de codificación del SOM se distribuyen de manera que tratan de aproximar la función de densidad de probabilidad de los datos de entrenamiento en el espacio de entrada. Esto significa que los vectores de codificación en el espacio de entrada presentan áreas más densas en aquellos lugares donde exista mayor número de datos de entrada. Por otro lado y dado que en el espacio de salida estos vectores se representan equiespaciados, resultará en proyectar las áreas con mayor densidad de probabilidad sobre zonas más amplias. El área dedicada a representar cierto estado será proporcional a la frecuencia estadística de aparición de dicho estado.

- Una de las características más importantes del SOM es sin duda la *preservación de la topología* del espacio de entrada en el de salida. Los vectores de codificación, una vez entrenados, no sólo se aproximan a la distribución de los datos de entrada, sino que además lo hacen de manera que conservan las relaciones de vecindad definidas en el espacio de salida (retícula de salida). Es decir, nodos \mathbf{g}_j cercanos en la retícula de salida representan a vectores \mathbf{m}_j vecinos en el espacio de entrada. El SOM tras el entrenamiento puede ser visto como una *red elástica* que envuelve los datos de entrada y que toma su forma. Este hecho puede verse claramente en la figura 4.3. La conservación de la topología proviene de la función de vecindad h_{cj} de (4.9) que se encarga del movimiento de adaptación, no sólo de la neurona ganadora, sino de las neuronas próximas en la retícula. Esta propiedad da cierta continuidad en la representación de estímulos similares en el espacio de visualización, activando áreas contiguas en este espacio para estados similares.

- Como se comenta con anterioridad otra característica interesante en el SOM es la *reducción de la dimensionalidad* del espacio de entrada al proyectarlo sobre el espacio de visualización (típicamente 2D). Esta propiedad es una consecuencia directa de las anteriores, gracias a que a la función resultante $S(\mathbf{x}_k)$ puede resumir en n coordenadas las p características del espacio de entrada, conservando la topología y aproximando la función de densidad de los datos de entrada.

El SOM como herramienta de análisis

El SOM por tanto es una herramienta de reducción de la dimensión capaz de representar datos de elevada dimensionalidad en un espacio mucho más fácil de visualizar (típicamente 2D). Esta reducción de la dimensión permite utilizar el SOM de manera visual a fin de lograr una mejor identificación de los estados del proceso.

La visualización de las diferentes características del SOM se lleva a cabo a través de los denominados *planos* o *mapas*. Los *planos de componentes* o *mapas de características* [58] permiten representar a través de una escala de color la componente escalar i -ésima de los vectores de codificación \mathbf{m}_j correspondiente a cada una de los puntos \mathbf{g}_j del espacio de visualización. De esta manera existen tantos planos de componentes como dimensiones posea el espacio de entrada (p). Estos mapas de componentes pueden entenderse como un mapa “*mudo*” del proceso, donde cada plano de características aportaría

la información de una variable para cada estado de funcionamiento, ver figura 4.6.

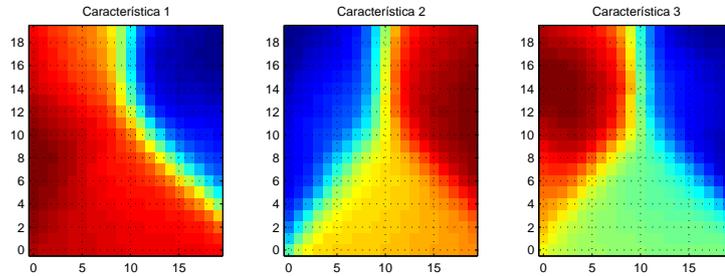


Figura 4.6: Mapas de características.

Los *mapas de distancia interneuronal* (U-Matrix en [93]) representan a través de un código de color la distancia promediada, en el espacio de entrada, de una neurona a sus vecinas, definiendo la vecindad en el espacio de salida. Dado que las neuronas del SOM tienden a agruparse en zonas con mayor densidad de datos de entrada, esta es una buena herramienta para la identificación de *clusters* o agrupaciones de los datos de proceso correspondientes a diferentes estados del proceso, ver figura 4.7.

De gran utilidad cuando existe un modelo conocido son los denominados *planos virtuales*. Es posible muchas veces, a través de la combinación de una serie de variables del espacio de entrada, definir algún tipo de modelo de mayor complejidad que la simple observación directa de dichas variables (ecuaciones matemáticas que describan procesos físicos muchas veces). Sea y una nueva variable función de las del modelo SOM x_1, x_2, \dots, x_p (4.11):

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_p) \quad (4.11)$$

Definida dicha función será posible evaluarla para cada uno de los vectores \mathbf{m}_j y representar luego los resultados $y_j = f(m_{j1}, \dots, m_{jp})$ en el espacio de salida según la proyección anterior, siendo el plano virtual el definido por $\{\mathbf{g}_j, y_j\}$.

Si utilizando las características del modelo fuera posible expresar un modelo de la forma (4.12):

$$f(x_1, x_2, \dots, x_p) = 0 \quad (4.12)$$

al calcular dicha función para cada uno de los vectores codificación se obtendría un valor que sería el residuo $\epsilon_i = f(m_{i1}, m_{i2}, \dots, m_{ip})$ de ese modelo. Este residuo será nulo para puntos que verifiquen el modelo y distinto de cero en caso contrario, puntos que no cumplan el modelo definido en 4.12. Al igual que los planos virtuales, este residuo puede ser representado en el espacio de salida mediante la proyección anterior $\{\mathbf{g}_j, \epsilon_j\}$. Estos *mapa de modelos* permiten comprobar realidades físicas de manera visual sobre el modelo SOM generado.

La interpretación del SOM y de sus mapas asociados no es tarea sencilla [21]. Una primera idea deberían darla las divisiones generadas en el mapa de distancias, ver figura 4.7. Éstas deben delimitar los principales *clusters* del conjunto, definiendo así las diferentes condiciones del mismo. En una aproximación inicial a los planos de componentes han de buscarse las regiones recurrentes en los diferentes planos delimitadas por colores. El color de dichas regiones harán referencia a la relación entre esas características (cuando una es alta la otra es baja, ...). Obviamente estas regiones deberán coincidir con las áreas diferenciadas en el mapa de distancias, sirviendo éste para definir el nivel de diferenciación entre las diferentes condiciones. Por otro lado, una correcta interpretación y explotación de las posibilidades de un SOM implica un conocimiento mínimo del proceso en estudio. La distribución de neuronas en un SOM pueden, además de confirmar relaciones ya existentes y conocidas del proceso, intuir nuevos fenómenos a la vez que apuntan al origen de los mismos.

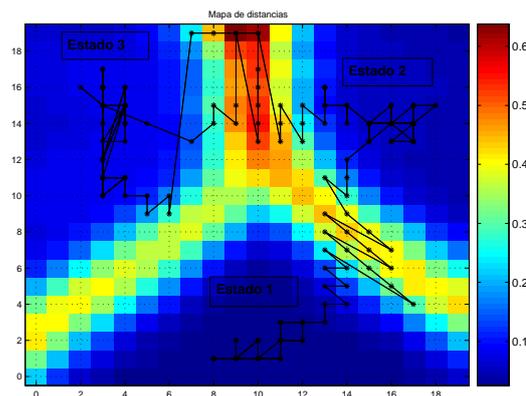


Figura 4.7: Mapas de distancias con la trayectoria de la evolución de unos datos de entrada y etiquetas en los estados detectados.

De acuerdo a [58], una de las tareas básicas al trabajar con el SOM consiste en el análisis de las trayectorias del proceso. En general la trayectoria

del proceso, consistente en las sucesivas imágenes de sus puntos de funcionamiento, puede ser representada en el SOM original junto a algunas etiquetas que indiquen información general sobre la condición del sistema. La misma trayectoria puede ser dibujada sobre los denominados *planos* o *mapas*, dándonos rápida indicación del valor de una variable del espacio de entrada para un estado dado. El análisis de la trayectoria es importante para el entendimiento del proceso. Existen procesos de naturaleza secuencial donde la trayectoria descrita puede incluso ser tratada como una serie temporal [69]. Otros no mantienen una evolución tan predecible, pero aún así, el proceso, suele discurrir por unas áreas determinadas (idealmente debería etiquetarse cada área con una condición del proceso). Sea como sea, para que un modelo tenga pleno significado en el estudio de, por ejemplo un estado anómalo, la trayectoria descrita por el mismo debe estar claramente definida, seguir algún tipo de patrón y no convertirse en una distribución aleatoria de puntos. En este último caso es preferible una nueva redefinición del modelo para así lograr un resultado más interpretable

4.3. El cálculo del residuo y su representación

La idea bajo el concepto de residuo es la separación de la parte “esperada” del proceso de aquella “no esperada” de acuerdo a un modelo previamente establecido. La observación de un residuo distinto de cero significará la desviación del comportamiento esperado y por tanto revelará un estado de fallo o al menos una situación novedosa para el modelo utilizado. Sin embargo para el análisis de la situación anómala detectada, la información de un solo residuo es limitada. Por ello es común la formulación de un vector de residuos tal que la combinación de sus diferentes componentes permita tareas de identificación y diagnóstico.

De vital importancia para el cálculo del residuo y su interpretación es la selección del modelo utilizado. Desde sistemas físicos redundantes a modelos analíticos explícitos, varias son las técnicas disponibles. De todas maneras la tarea del modelo es siempre común: generar una respuesta capaz de ser comparada con el proceso real a partir de una serie de entradas existentes en el proceso.

El enfoque basado en datos, utilizado en este trabajo, es otra de las técnicas capaces de generar modelos de un proceso. Tradicionalmente este enfoque delimita un nuevo subespacio a través del cual queda definido el modelo. De

esta manera la proyección de cualquier punto de funcionamiento que cumpla el modelo (comportamiento esperado) será el mismo punto original. En el modelado con SOM el subespacio (o superficie) del modelo viene definido por los vectores codificación \mathbf{m}_k , de tal manera que la proyección de un punto sobre el modelo será el vector codificación más cercano o neurona ganadora \mathbf{m}_c . Es posible expresar matemáticamente y de manera sencilla el vector de residuos para un mecanismo de técnicas de proyección (4.13): la diferencia entre el estado actual del proceso \mathbf{x} y el estado esperado del mismo (la proyección) $\hat{\mathbf{x}}$ de acuerdo al modelo.

$$\mathbf{r} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}} \quad (4.13)$$

4.3.1. El residuo basado en PCA y en SOM

Como se comenta anteriormente, el cálculo del residuo es una etapa fundamental dentro de un sistema de diagnosis. A pesar de la simplicidad en su concepto, las propiedades del residuo son diferentes de acuerdo al modelo utilizado. El cálculo de residuos sobre un modelo PCA ha sido ampliamente desarrollado, existiendo extensa literatura al respecto [59][108]. El residuo a través de PCA es bastante similar a aquel calculado mediante SOM, sin embargo ambos guardan algunas diferencias importantes.

En primer lugar PCA es una técnica lineal, es decir, ajusta los datos a una estructura del tipo lineal (por ejemplo un plano). Es por ello que para agrupaciones de datos complejas PCA puede no recoger todas las características topológicas de los datos. Sin embargo y dado que el SOM es una red neuronal no lineal, éste permite un mejor ajuste a disposiciones complejas de datos. En la figura 4.8 es posible ver esta particularidad a través de una estructura de datos de cierta complejidad. El modelo generado por PCA, figura 4.8(a), apenas puede recoger la particularidad de la estructura de los datos por su carácter lineal, mientras que el modelo SOM, figura 4.8(b), si permite recoger una mayor información del conjunto.

Otra característica relacionada con el mecanismo de proyección es el ámbito del residuo. El residuo del SOM se circunscribe solo al área definido por el conjunto de datos de entrenamiento, por tanto los resultados de las proyecciones están limitadas, dentro de \mathbb{R}^n , solo al soporte del conjunto de datos de entrenamiento (conjunto de puntos cuya función de probabilidad es distinta de cero). Sin embargo las proyecciones con PCA no están limitadas

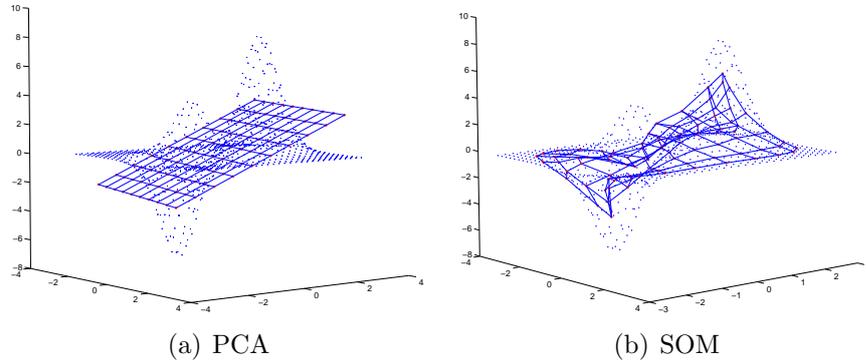


Figura 4.8: Modelos generados mediante PCA (a) y SOM (b). Las características de linealidad son patentes.

al soporte de los datos y éstas podrían resultar virtualmente en cualquier punto de un subespacio de extensión infinita, figura 4.9. Esta característica introduce una nueva particularidad a considerar en el cálculo de residuos con PCA. La definición tradicional de residuo, como la diferencia entre un nuevo dato y su proyección sobre el modelo, queda plasmada en el estadístico Q , ver figura 4.9. Sin embargo y dado el carácter infinito de la ubicación de las proyecciones en un esquema PCA, será necesario definir también un nuevo estadístico T^2 , ver figura 4.9, que medirá la distancia desde el centro de la estructura de datos a la proyección misma, para así definir perfectamente las características del residuo.

En el cálculo de residuos a través de PCA estos dos estadísticos fundamentales se definen como:

$$Q = \sum_{i=1}^p (x_i - \hat{x}_i)^2 \quad (4.14a)$$

$$T^2 = \sum_{i=1}^n \frac{t_i^2}{s_{t_i}^2} \quad (4.14b)$$

donde t_i es el peso i -ésimo de las componentes principales tomadas y $s_{t_i}^2$ es la varianza de t_i ; x_i y \hat{x}_i son la componente i -ésima de los vectores de muestras y de su valor proyección ortogonal sobre el modelo respectivamente; n y p denotan el número de componentes principales tomadas y el número de variables que componen el vector de muestras (o dimensión del espacio de salida y de entrada respectivamente). El estadístico Q (o SPE, *squared prediction error*) sería el módulo al cuadrado del residuo vectorial, la diferencia

entre una muestra del proceso y la correspondiente según el modelo (proyección ortogonal sobre el hiperplano definido por el PCA). T^2 (Hotelling) es la segunda medida, referente a la posición de la proyección respecto al conjunto de los datos, necesaria dado que el ámbito de expresión del PCA es infinito. El estadístico T^2 forma una elipse la cual representa el límite de variación que puede ser explicado de manera natural (sin significar un fallo). Para un nivel de significancia α , el proceso es considerado normal si $T^2 \leq T_{\alpha}^2$. El límite T_{α}^2 puede ser calculado de varias maneras [83]. En la figura 4.9 puede verse un esquema de ambos estadísticos donde se comprueba claramente la distinción entre ellos.

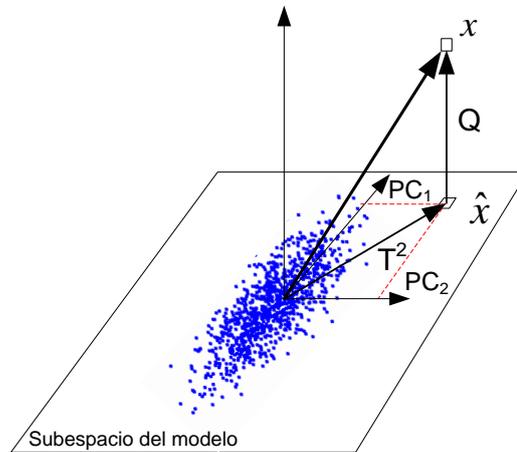


Figura 4.9: Proyección sobre el subespacio definido por PCA: dos distancias han de ser calculadas, el residuo mismo (Q) y otra relacionada con su posición en ese subespacio (T^2).

Además de requerir el cálculo de dos estadísticos, la interpretación de ambos puede resultar algo compleja o al menos necesitar de etapas adicionales de cálculo. El análisis de la información arrojada por los residuos ayuda a los operadores del proceso a establecer el origen del fallo y sus causas. En PCA se desarrollan los denominados *contribution plots* [65], elementos gráficos donde se analiza la contribución de cada variable de entrada a los valores de los estadísticos T^2 y Q . Dichas herramientas revelan el grupo de variables de proceso que llevan a cabo la mayor contribución a la desviación del proceso. Aunque estos gráficos no llevan a cabo un diagnóstico inequívoco si arrojan mucha información sobre las posibles causas del suceso. En la figura 4.10 puede observarse la evolución de un residuo calculado mediante PCA a través de los estadísticos Q (SPE) y T^2 . En la gráfica vertical se observa un *contribution plot* donde se muestra la aportación de cada una de las variables

al estadístico Q .

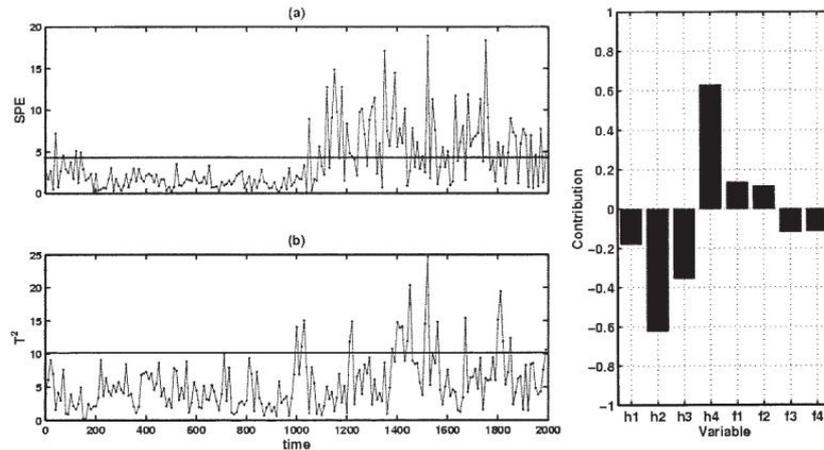


Figura 4.10: Representación de un residuo: las primeras gráficas muestran la evolución de los dos estadísticos Q (SPE) y T^2 ; en el gráfico vertical se observa un *contribution plot* del estadístico Q correspondiente a un cierto instante de tiempo.[42]

Sin embargo los residuos calculados a través del SOM son de interpretación inmediata debido al hecho de que cada componente del vector de residuos representa una característica del vector de entrada directamente y por tanto la p -ésima componente del vector de residuos \mathbf{r} , será la contribución al residuo de la variable p -ésima, del conjunto de variables de entrada.

Interpretación visual del vector de residuos SOM

Las información de un vector de residuos puede ser interpretada atendiendo a la magnitud y signo de cada una de las componentes del mismo. Como las componentes de un residuo SOM son directamente las características del modelo, la interpretación del mismo puede ser casi inmediata. Para las muestras de entrenamiento el vector de residuos deberá arrojar valores cercanos a cero. Cuando se produzca un estado anormal el vector de datos del proceso estará fuera de la distribución de los datos de entrenamiento, revelando residuos significativos diferentes. A través de un mecanismo de visualización apropiado, el análisis de residuos puede ser una herramienta muy útil para la detección e identificación de fallos, debido a la de sobra conocida capacidad humana de detección y análisis de patrones presentados de manera visual. Se sugiere para esta representación la siguiente estrategia [25]:

- En cada instante (t) se calcula el vector de residuos: $\mathbf{r}(t) = \mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t)$
- Se actualiza una matriz que contiene los k últimos vectores de residuos calculados: $\mathbf{U}(t) = [\mathbf{r}(t - k + 1), \dots, \mathbf{r}(t)]$
- En cada instante se visualizan los elementos de la matriz $\mathbf{U}(t)$ utilizando una apropiada escala de colores para los valores de \mathbf{U}

Es importante seleccionar bien el tipo de escalas y el rango de los mismos para una óptima visualización. El mecanismo adoptado genera un tipo de gráficos de fácil interpretación. Mientras el proceso se encuentre en condiciones normales (estados contemplados por los datos de entrenamiento) todas las componentes muestran el mismo color (por ejemplo verde). Cuando alguna de las componentes del vector de residuos se aleja de cero, es muy fácil observar el signo de la desviación (por ejemplo, azul para un valor menor de lo esperado por el modelo y rojo para uno mayor). Además y según la escala de color elegida, la magnitud de esta desviación puede ser rápidamente percibida (de amarillo a rojo pasando por naranja desde residuos bajos a otros de mayor magnitud en este caso). Como en la matriz visualizada se utilizan los k -ésimos últimos residuos, será posible observar de un vistazo la evolución del vector de residuos y aplicar el conocimiento experto sobre el proceso.

En la figura 4.11 se observa el resultado de esta metodología visual para un modelo SOM de cinco características. Las zonas en verde (residuo cero) son datos del propio grupo de entrenamiento proyectados. En la zona media se proyecta un grupo de datos diferente al de entrenamiento, cabe observar como la magnitud y la dirección de desviación del modelo de cada magnitud puede fácilmente observarse de un solo vistazo.

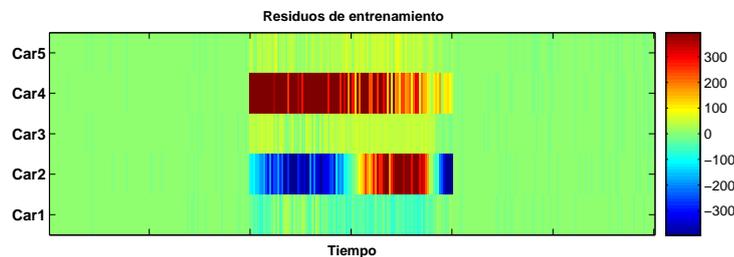


Figura 4.11: Mapa de residuos de un modelo de 5 características generado por SOM.

4.3.2. Estrategias para el cálculo e interpretación de residuos SOM

Los modelos basados en datos constituyen una buena alternativa ante el problema de detección de fallos. Sin embargo la identificación y diagnóstico requiere un planteamiento más cuidado. En [108] se puede encontrar un método para mejorar los resultados de estas labores a través de la incorporación de información sobre episodios de fallo anteriores, todo ello basado en un vector de residuos generado por PCA.

Esta sección trata de abordar las peculiaridades del trabajo con vectores de residuos generados con SOM. El vector generado así como su interpretación depende de la estructura del modelo SOM así como de los datos utilizados y del tipo de estados o condiciones que éstos recogen. En este tipo de planteamientos cabe diferenciar aquellas características esenciales del proceso, es decir, con un significado físico y una relación clara con el proceso (presión, temperatura, fuerza, ...) y aquellas relacionadas con algún parámetros de calidad definido sobre el proceso (tolerancia, velocidad producción, ...). Según la evolución de unas u otras, el resultado obtenido y la interpretación del diagrama de residuos es diferente.

Existen dos grandes estrategias para el planteamiento de un enfoque basado en residuos: una orientada a la detección de novedades en el proceso y otra donde se pretende identificar funcionamientos anómalos o fallos. Según sea una u otra la orientación del análisis la filosofía para la creación del modelo basado en datos es diferente. En un sistema de detección de novedades se busca construir el modelo con un conjunto de datos tal que abarque la mayor cantidad posible de estados de funcionamiento del proceso. De esta manera un residuo elevado significará estar fuera del modelo en un punto de funcionamiento desconocido hasta ahora. Por otro lado en la identificación de fallos es preferible componer modelos sólo con datos provenientes de funcionamientos extremadamente buenos del proceso y así poder comparar la desviación en el modelo de los estados de funcionamiento deficiente.

Detección de novedades

Supóngase que un grupo de variables esenciales del proceso muestre un gran residuo (desviación de lo esperado por el modelo). Esto puede significar que un nuevo estado de funcionamiento ha sido detectado y por tanto un nuevo modelo que incluya a este estado deberá ser confeccionado e incorporado

al sistema de diagnóstico. La capacidad del SOM de identificar y caracterizar nuevos estados es una ventaja en este tipo de planteamientos.

Para ilustrar este planteamiento se comenta a continuación un ejemplo relacionado con la industria del acero. La elevada complejidad del proceso, la falta de modelos analíticos funcionales y la gran cantidad de datos disponibles convierten a este proceso en un buen candidato para la aplicación de sistemas de diagnóstico basados en datos, en especial aquellos mediante SOM [15].

Se denomina grado del acero al tipo de composición química del material que, entre otros, le otorga unas características mecánicas únicas. El abanico de grados de acero procesado por una factoría moderna se amplía día a día debido a la creciente demanda de nuevos y mejores productos. A fin de mantener un nivel de producción de alta calidad, las características de estos nuevos materiales deben ser correctamente definidas. El ajuste inicial de varios parámetros funcionales de la instalación, así como las ganancias y otros parámetros de los sistemas de control son establecidos en base al tipo de material procesado y sus propiedades.

En este ejemplo se construye un modelo relacionado con el proceso de laminación. Este modelo es entrenado con datos de un solo grado de acero (una sola curva de endurecimiento y composición química). A través del conocimiento experto y la teoría clásica de laminación [87] varias características esenciales del proceso de laminación fueron seleccionadas como variables del espacio de entrada en el modelo SOM generado:

- Fuerza de laminación en las 5 cajas (F_1, F_2, \dots).
- Tensión entre cajas (σ_{1-2}, \dots).
- Velocidad periférica de los rodillos en cada caja (V_{R_1}, \dots).

En la figura 4.12 pueden observarse los planos de componentes y el mapa de distancias del modelo SOM generado. En dicho modelo varios estados son fácilmente identificados. Un primer vistazo al mapa de distancias da una idea de la distribución de las regiones de cada estado. La posterior comparación de estas regiones con el resto de planos de características caracterizan dichas regiones. Algunos estados tienen un claro sentido físico y vienen a confirmar tesis de la teoría clásica de laminación. Por ejemplo en una de las regiones mejor delimitadas (zona inferior y media de la izquierda) la tensión entre la caja 4-5 es alta (zona roja) mientras que la fuerza de laminación es baja (zona azul), fruto del juego existente entre estas fuerzas. En general un análisis

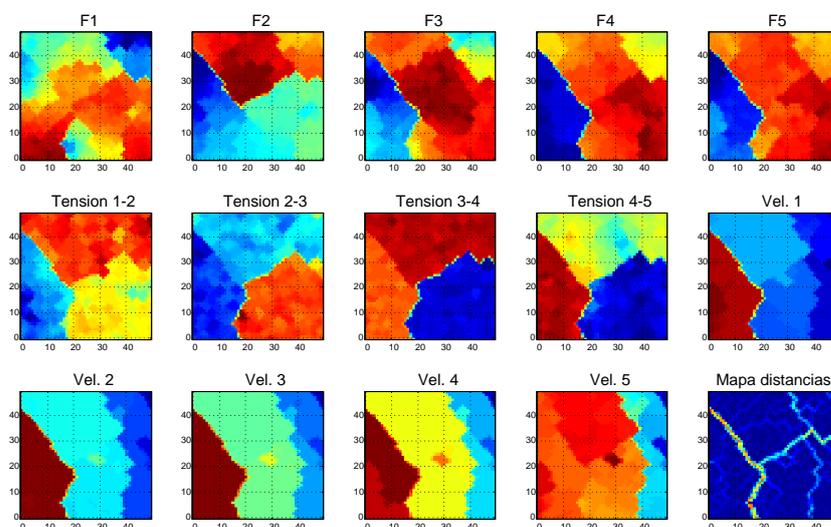


Figura 4.12: Planos de componentes del modelo entrenado, la última gráfica corresponde al mapa de distancias.

detallado de este tipo de gráficos puede aportar interesante información del desarrollo del proceso.

A fin de recrear un proceso de detección de novedades se simuló la introducción de nuevos tipos de materiales en el proceso de laminación (materiales de grado B y C). Para tal fin se construye una secuencia compuesta por las mismas bobinas del modelo (material grado A), otras del mismo tipo de acero del modelo entrenado, más otras bobinas de dos nuevos tipos de acero. En la figura 4.13 puede verse la evolución del residuo asociado a dicha secuencia de bobinas. El área perteneciente a las bobinas del modelo permanecen en verde (residuo de valor cero), mientras que algunas desviaciones del modelo se encuentran de manera aislada en aquellas de un grado igual al del modelo. Sin embargo aquellas bobinas de diferente grado (grado B y C) presentan desviaciones del modelo mucho más generalizadas entre las características que conforman el modelo. De hecho el grado B presenta un residuo positivo (residuo amarillo en fuerzas 1 y 2), es decir, este grado necesitará más fuerza que la aplicada para el grado A. Mientras tanto, el grado C presenta un residuo negativo (color azul en las fuerzas) por tanto parece necesitar menos fuerza para ser laminado. Estas conclusiones confirman el hecho por el cual el módulo de Young del grado B es el más alto de los tres mientras que el de C es el más bajo.

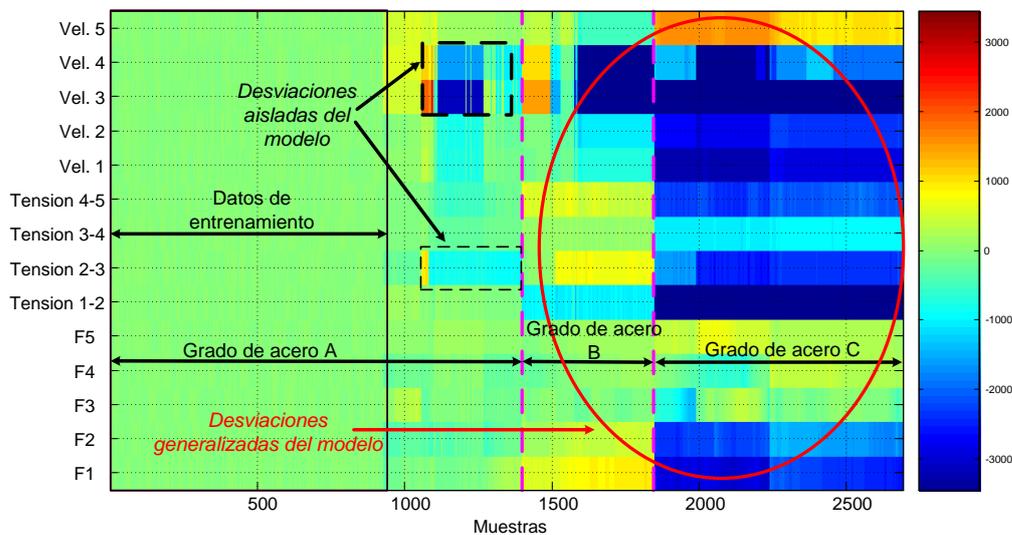


Figura 4.13: Representación visual de residuos. Los diferentes grados de acero son fácilmente apreciables según la distribución de colores, especialmente aquellos más alejados de los datos de entrenamiento.

Un ejemplo de detección e identificación de fallos

Supóngase ahora un incremento en el residuo de una característica de calidad. Este hecho apuntará claramente a un estado de fallo del proceso, donde un análisis posterior incluyendo la comparación de la evolución del fallo con el resto de características puede apuntar al origen y causas del mismo.

Un buen punto de partida para el diseño de un sistema FDI funcional es el de componer un grupo de datos que contemple estados donde el rendimiento del proceso ha sido extremadamente bueno y con éste generar el modelo. Posteriormente se proyectan sobre dicho modelo nuevos datos de funcionamiento al mismo tiempo que se comparan los residuos a fin de definir el porqué del buen funcionamiento de los datos del modelo. Obviamente datos de episodios de mal funcionamiento o provenientes de productos de baja calidad estarán más alejados del modelo que otros provenientes de casos de una calidad media.

Se construyó un modelo SOM con datos provenientes de un grupo de bobinas de una extremadamente alta calidad procesadas a lo largo de varios meses en las instalaciones. Es importante definir el concepto de calidad: en este caso se trata de un indicador muy utilizado en la factoría y que

está relacionado con el porcentaje de material, sobre la longitud total de una bobina, cuyo error de espesor está por debajo de un cierto umbral. Según las características elegidas y el significado de las variables de calidad tomadas, la interpretación del modelo puede cambiar mucho. Además de esta característica de calidad, fuerzas, tensiones y velocidad de laminado se tomaron como variables esenciales del proceso de acuerdo al conocimiento experto de los operadores de planta.

Por último se añaden la reducción total experimentada por la banda y el grado de acero. Estas características parecen ser muy importantes para el proceso de laminado. Estudios posteriores indican que los valores de *preset* de la instalación se ajustan según una serie de variables, entre ellas y muy importantes son la reducción y la dureza del acero (grado). Por ello y para la generación de un modelo apropiado, estas variables se incluyen en el estudio. De hecho, para un mejor rendimiento del sistema, sólo estas características fueron seleccionadas para la elección de la BMU respecto a la cual se calcula el residuo (sólo intervienen estas variables en los cálculos de distancias en el espacio de entrada). Esta decisión, que se sale fuera del mecanismo ordinario, se toma de nuevo en base al conocimiento experto sobre el proceso. Es práctica habitual que el valor general de variables tales como fuerza o tensión se tomen a través del valor de ciertas variables tabuladas como reducción, grado de acero, ... Es por ello que se adoptan estas últimas como características para el entrenamiento del modelo a fin de ver la evolución del resto de variables y comprobar cuanto se alejan del comportamiento buscado.

En la figura 4.14 se representan algunos de los planos de componentes del modelo SOM entrenado: debido a la alta calidad de las bobinas utilizadas el error de espesor será bastante homogéneo (mismo color); los planos de reducción y grado de acero presentan dos tipos de acero y diversos ratios de reducción. Por último el mapa de distancias muestra los diferentes *clusters* detectados muy similar a las características de reducción y dureza.

Se compone un grupo de datos para el cálculo de residuos: una bobinas de baja calidad; una de calidad media y un espécimen de buena calidad (aunque de menor calidad que aquellas utilizadas en el modelo). Se lleva a cabo la proyección sobre el modelo, también sólo teniendo en cuenta el grado de acero y la reducción. Este paso se lleva a cabo a fin de observar la evolución del punto de funcionamiento (marcado por las variables responsables de los *presets*) sobre el grupo de variables esenciales (fuerzas, tensiones, ...). Esta estrategia se adopta específicamente para un proceso de estas características y es resultado de un conocimiento experto del proceso.

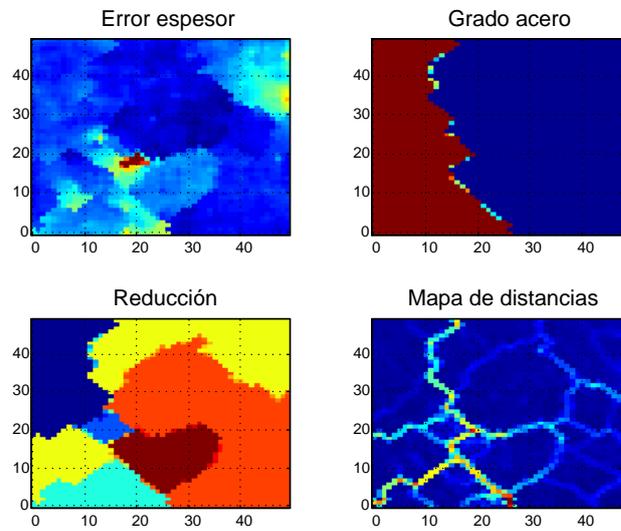


Figura 4.14: Planos de componentes del modelo de bobinas de alta calidad del error de espesor, grado de acero y reducción, además del mapa de distancias.

El cálculo y representación de los residuos se muestra en la figura 4.15, donde los residuos de reducción y grado de acero son cero probando que el modelo identifica perfectamente los datos introducidos y los relaciona con el *cluster* debido. El residuo en la fila correspondiente al indicador de calidad (*thickness error*) disminuye al aumentar la calidad, i.e. las bobinas buenas son más cercanas a las del modelo (bobinas de alta calidad). Por otro lado las bobinas de baja calidad parecen bastante más lejanas al modelo que las de los otros grupo (menos zonas verdes). De hecho puede verse como para bobinas de buena calidad las variables esenciales del proceso son cercanas al valor de las mismas en las bobinas del modelo, siendo la desviación en la velocidad de laminación (menor que la del modelo) la principal inhomogeneidad de acuerdo a la representación de residuos.

En ambos ejemplos se debe destacar varios puntos importantes. El primero es sin duda la necesidad de un conocimiento experto amplio así como una comprensión del mecanismo físico estudiado: la etapa de selección de características, de confección del conjunto de datos de entrenamiento, el método de entrenamiento del SOM o la misma interpretación del vector de residuos debe llevarse a cabo bajo el prisma de un conocimiento *a priori* del proceso. En segundo lugar cabe destacar que el diseño del sistema se orienta según el aspecto a monitorizar, así es diferente buscar las causas de un determinado

fallo, que detectar un episodio de baja calidad o caracterizar un nuevo estado.

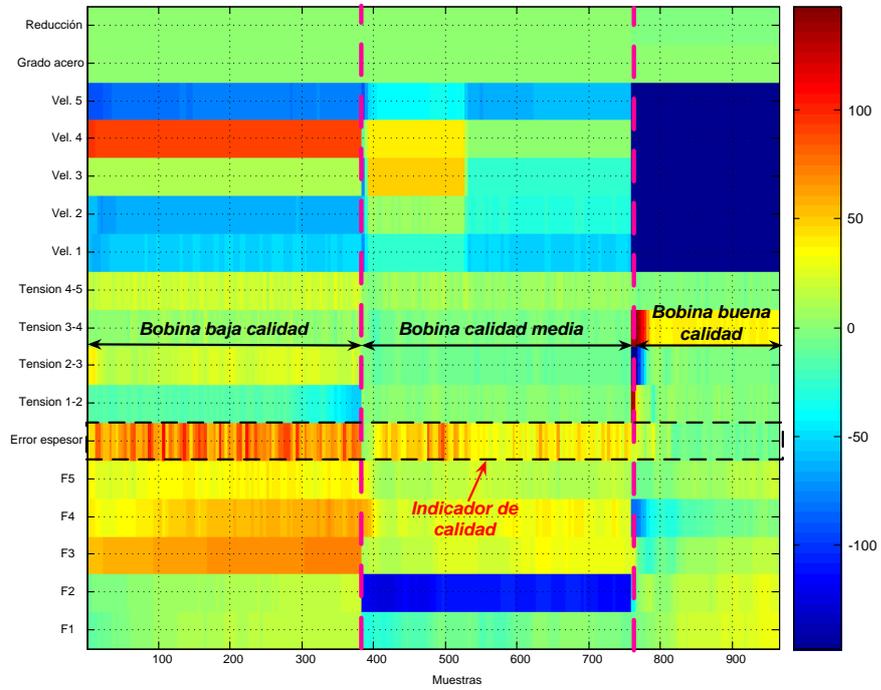


Figura 4.15: Gráfico de residuos con los 3 grupos de bobinas de diferente calidad.

Capítulo 5

Análisis del fenómeno del *chatter* en una planta industrial real de laminación en frío

5.1. El *chatter* de tercera octava

El estado vibratorio de un tren de laminación en frío es altamente complejo, derivado en buena parte del elevado número de elementos de muy diversa naturaleza en acción. Además, no debe olvidarse, que el proceso de laminación en frío consiste en una interacción entre el material procesado con el conjunto del laminador. Es por ello que las condiciones propias del material influyen en buena medida en el estado final del tren, en cuanto a vibraciones se refiere.

De esta manera y tomando un rango de entre 0-1 kHz, una bobina presenta un estado vibratorio (medido en el tope de la caja) con una distribución de frecuencias en el tiempo similar a la presentada en la figura 5.1. En dicho espectrograma es posible observar vibraciones directamente relacionadas con los procesos de aceleración y deceleración del tren, bandas de frecuencia con especial concentración de energía, instantes con repentinos incrementos de energía para una frecuencia dada e incluso comportamientos con un aparente alto grado de aleatoriedad.

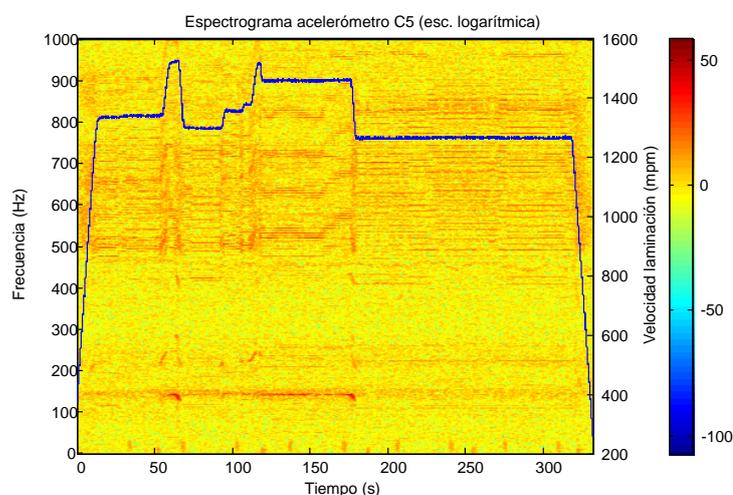


Figura 5.1: Espectrograma de la señal de vibración del periodo de laminación de una bobina. La señal en azul representa el perfil de velocidad de los rodillos de trabajo.

5.1.1. Definición del *chatter* en este estudio

La definición correcta del fenómeno vibratorio conocido como *chatter* de tercera octava (comúnmente referido como *chatter*) es compleja debido a las luces y sombras que su propia naturaleza arroja (los trabajos de [89] y [90] son un buen comienzo). La principal característica de este fenómeno y que además le otorga el nombre, es la particular banda de frecuencias en la que se manifiesta, una vibración en el rango de tonos audible de tercera octava. Este intervalo es bastante amplio según los autores consultados, así [113][54] establecen el *chatter* entre 150 Hz y 250 Hz.

Dentro de los pocos estudios que, como el llevado a cabo en esta tesis, están basados en datos reales de una planta industrial de laminación en frío cabe destacar [77] donde se trabaja con una frecuencia de *chatter* de unos 116 Hz o [11] donde esta frecuencia se eleva a 127 Hz. En contraste con éstos, este estudio no encuentra una determinada frecuencia característica del *chatter* sino más bien un rango de frecuencias para el tren de laminación estudiado. Este abanico de valores sigue una distribución con un máximo en 148 Hz como se observa en la figura 5.2. Este hecho implica que el *chatter* depende, no sólo de las características constructivas del tren, sino también del estado de los diferentes aspectos que influyen, cada instante, en el proceso de laminación en frío (tales como el material laminado o la propia lubricación del área de mordida).

Otra de las características clásicas del *chatter* es sin duda su súbita apa-

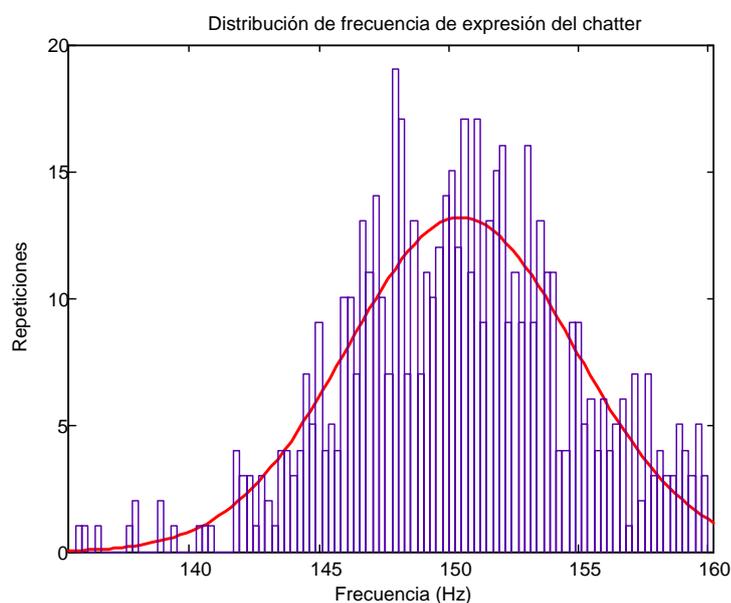


Figura 5.2: Histograma con la distribución de frecuencias de aparición de *chatter*.

rición y la extremada virulencia con que actúa. Ante un episodio de *chatter*, en la planta en estudio, se observa un incremento repentino de la señal vibratoria tomada por los acelerómetros de las cajas afectadas. Este incremento de señal se concentra en la banda de frecuencias antes mencionada. Al filtrar la señal para obtener las componentes de este rango particular, la magnitud del incremento es fácilmente apreciable, de casi un orden de magnitud. En la figura 5.3 se observa la lectura del acelerómetro de la caja 4 para una bobina con *chatter*; el incremento súbito se percibe fácilmente tomando esa misma señal, pero filtrada, para obtener la banda de frecuencias del *chatter*.

En la figura 5.5 se muestra el espectrograma de la bobina anterior donde se comprueba que el aumento general de energía de las vibraciones se concentra únicamente en la banda del *chatter*, siendo esta distribución de energía una de las características propias del *chatter*. En concreto esta banda posee tres episodios de *chatter* bien diferenciados como es apreciable en ambas figuras.

En resumen se puede destacar de este fenómeno:

- Es de aparición súbita, sin apenas un periodo claro de establecimiento, ver figura 5.4.
- Supone un incremento de un orden de magnitud sobre la energía general

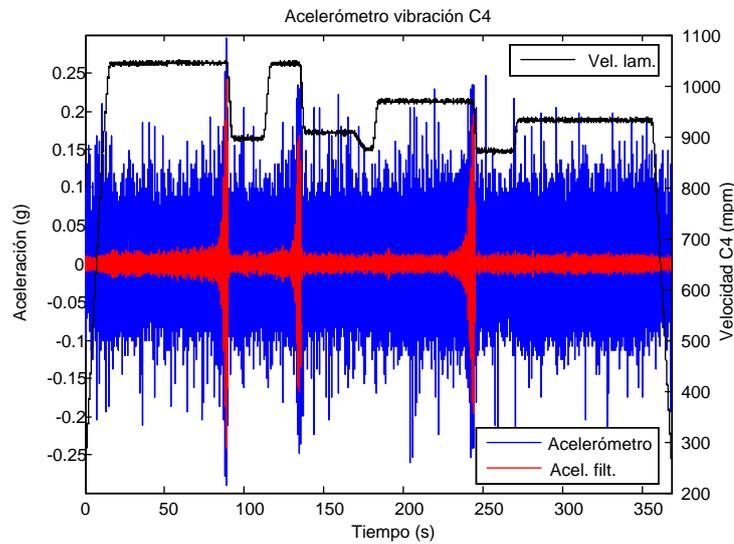


Figura 5.3: Evolución de las vibraciones de la caja 4 (en bruto y filtrado para la banda de *chatter*) y de la velocidad de laminación.

de vibración en esa banda.

- El incremento de energía se concentra en una banda de frecuencias determinada (140-160 Hz para esta instalación).

Por último, y sin duda la característica clave del *chatter* de tercera octava, es su carácter autoexcitado [18]. Los sistemas autoexcitados comienzan a vibrar de manera espontánea al tiempo que su amplitud se incrementa hasta que algún fenómeno externo la limita. La fuerza que alimenta dicha vibración es creada por su propio movimiento y se anula cuando dicho movimiento lo haga. Al contrario, en una vibración

forzada la fuerza que genera la vibración es independiente del movimiento, es decir, la fuerza persistirá a pesar de anular la vibración y esta frecuencia de vibración será dependiente de la frecuencia de la señal forzada. Las vibraciones autoexcitadas están íntimamente ligadas al concepto de equilibrio inestable y al de frecuencia natural. En términos matemáticos corresponden a la solución homogénea, de carácter inestable, del sistema de ecuaciones de movimiento, mientras que las de tipo forzado son la solución particular al

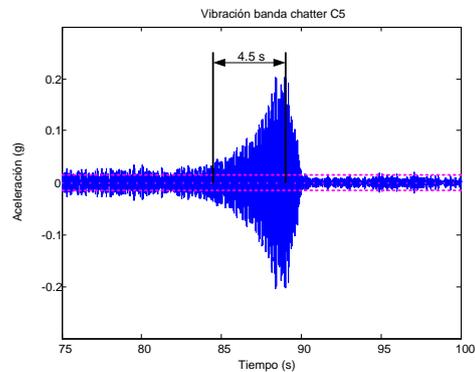


Figura 5.4: Formación del *chatter*.

sistema de ecuaciones no homogéneo. Existen por tanto dos aspectos importantes que definen la naturaleza del *chatter*: el carácter inestable del sistema durante el fenómeno y una respuesta en frecuencia coincidente con alguna frecuencia natural del conjunto tren-material, dentro del rango de tercera octava.

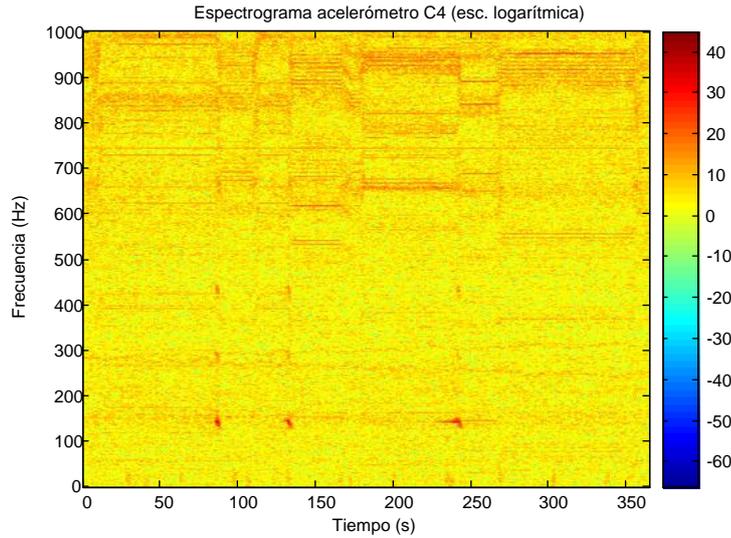


Figura 5.5: Espectrograma de la señal de vibración de la caja 4. Nótese los 3 episodio de *chatter* en torno a 150 Hz.

Carácter autoexcitado

Varios son los autores que han tratado de describir la mecánica del ciclo de autoexcitación. Entre ellos sin duda destacar los trabajos de [89] y [90] considerados autoridades en el campo. Este mecanismo tiene su origen en el propio área de mordida y es consecuencia de la necesaria continuidad de flujo de material en el proceso de laminación (5.1):

$$h_e V_e = h_s V_s \quad (5.1)$$

donde h_e y h_s son los espesores de la banda a la entrada y la salida de la caja y V_e y V_s las velocidades de la banda en los mismo puntos. Mediante la linealización de la ecuación anterior en torno a un punto de equilibrio (h_{e0} , V_{s0} , h_{s0}), es posible observar como cambios en el espesor de entrada o salida modificarán la velocidad de entrada (en general se supone la velocidad de salida constante) (5.2).

$$\Delta V_e = \frac{V_{s0}}{h_{e0}} \Delta h_s - \frac{V_{s0} h_{s0}}{h_{e0}^2} \Delta h_e \quad (5.2)$$

Los cambios en la velocidad de entrada afectan a la tensión de entrada de la banda a través de la expresión (5.3):

$$\Delta \sigma_e = \frac{E}{L} \int (V_e - V_c) dt \quad (5.3)$$

donde E y L son el módulo elástico del material y la longitud de la banda y V_c la velocidad de la banda en su cabecera (velocidad de la banda a la salida de la caja previa). Es necesario ahora evaluar el efecto sobre la fuerza de laminación que los cambios de tensión de entrada producen y así poder analizar después el comportamiento del espesor de salida. Para ello vamos a suponer, de manera simplificada, que la fuerza ejercida por el material sobre los rodillos (F) depende sólo de los espesores y tensiones a la entrada y salida de la caja (5.4a). Linealizando una expresión de ese tipo para un punto de funcionamiento determinado quedará (5.4b):

$$F = F(h_e, h_s, \sigma_e, \sigma_s) \quad (5.4a)$$

$$\Delta F = \left. \frac{\partial F}{\partial h_e} \right|_0 \Delta h_e + \left. \frac{\partial F}{\partial h_s} \right|_0 \Delta h_s + \left. \frac{\partial F}{\partial \sigma_e} \right|_0 \Delta \sigma_e + \left. \frac{\partial F}{\partial \sigma_s} \right|_0 \Delta \sigma_s \quad (5.4b)$$

Se establece por tanto un bucle realimentado entre las variables de espesor de salida, velocidad y tensión. El carácter autoexcitado del sistema realimentado se explica viendo la evolución dinámica de las variables a través de las ecuaciones anteriores. Un incremento en el espesor de salida, implica un aumento de la velocidad de entrada para mantener la continuidad (supuesto h_e y V_s constantes). Este incremento de velocidad representa a su vez un incremento de la tensión de entrada de la banda (supuesto V_c constante). Por último un aumento de la tensión de entrada disminuye el grado de fuerza a aplicar necesaria para la reducción propuesta (recordar que $\left. \frac{\partial F}{\partial \sigma_e} \right|_0 < 0$), traduciéndose ésto en una reducción del espesor de salida dejando inalterada el nivel del fuerza inicial ($\Delta F = 0$), ver figura 5.6. Esto se puede verificar tomando el espesor de entrada y la tensión de salida como constantes ($\Delta h_e = 0$ y $\Delta \sigma_s = 0$)

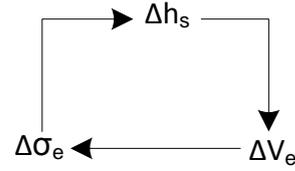


Figura 5.6: Ciclo de autoexcitación.

y sustituyendo luego en (5.4b), obteniéndose así una expresión para las variaciones en el espesor de salida (5.5), donde cabe decir que ambas derivadas parciales son negativas.

$$\Delta h_s = - \frac{\left. \frac{\partial F}{\partial \sigma_e} \right|_0}{\left. \frac{\partial F}{\partial h_s} \right|_0} \Delta \sigma_e \quad (5.5)$$

En [74], un trabajo sobre datos reales, se apunta que durante el periodo de inestabilidad, el desfase entre la oscilación del espesor de salida y la tensión de entrada son aproximadamente de 90° y que esta es una característica del proceso inestable. También, y según la filosofía del ciclo autoexcitado, las señales de fuerza y tensión deberán estar desfasadas 180° .

Sin duda los efectos de las variaciones de tensión sobre el sistema son los más complejos de describir dada la necesidad de dimensionar correctamente los coeficientes en derivadas parciales. En la figura 5.7 se representan los resultados de ciertas variaciones típicas en el área de laminación. Existe un equilibrio entre la curva de deformación de castillete (curva BEH) y de la banda (curva DEF) para un nivel de fuerza y un entrehierro o *gap* dados (supuesto éste como espesor de salida). El aumento de la tensión de entrada implica el giro de la curva DEF hasta formar la nueva curva GHI. El equilibrio de esta nueva curva con la anterior del castillete genera un nuevo punto de equilibrio caracterizado por un fuerza y un espesor de salida menor.

De la capacidad del sistema realimentado de amortiguar estas variaciones dependerá la estabilidad del lazo y por tanto la aparición de un mecanismo autoexcitado. Dicho amortiguamiento será dependiente de los múltiples aspectos presentes en la laminación, desde características de elementos constructivos del tren (castillete, rodillos, ...) hasta el estado de rozamiento y lubricación en el área de mordida, teniendo en cuenta por supuesto la velocidad de laminación.

Más difícil es la definición del *chatter* si consideramos la caja dentro del conjunto del tren de laminación. En este caso los lazos de realimentación de las cajas individuales se verán afectados por la dinámica de las cajas contiguas. Si una caja comienza a vibrar transmitirá sus variaciones a otras cajas elevando el rizado en el espesor que, al atravesar las diferentes cajas en estudio, pueden empeorar el nivel de vibración ya existente.

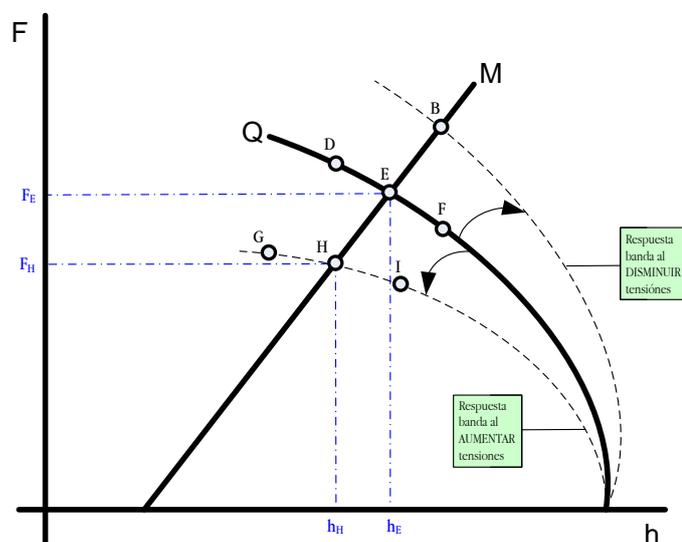


Figura 5.7: Comportamiento dinámico del conjunto caja-material ante variaciones en el tiro.

Respuesta en frecuencia del conjunto de laminación

La otra parte del binomio fundamental para el estudio del *chatter* es la respuesta en frecuencia del conjunto laminador. Un tren de laminación es un conjunto altamente complejo donde interactúan elementos mecánicos de muy diversa naturaleza. Cilindros hidráulicos, rodillos de laminación y el propio material en proceso conforman un sistema de naturaleza heterogénea que a su vez se verá influenciado por variables tales como refrigeración o lubricación. Es por ello casi imposible tratar de obtener una respuesta frecuencial exacta a través de un modelo matemático directo. Tradicionalmente la caja de laminación se modela como un conjunto de masa-muelle-amortiguador [89][109], otros estudios llevan a cabo un modelo de elementos finitos para tal fin [84], mientras que otras iniciativas tratan de identificar el sistema mediante estimación de parámetros [77].

La lucha contra el *chatter* y el caracter autoexcitado

En realidad no existe un acuerdo global sobre las causas de aparición del *chatter* en la laminación en frío y aún menos una solución técnica ampliamente utilizada. En la práctica una de las maneras más eficaces para su eliminación es la bajada de la velocidad de laminación. Algunas plantas disponen de un conjunto de acelerómetros que monitorizan la señal de vibración

(filtrada en el rango del *chatter*) para que una vez traspasado un umbral se reduzca bruscamente la velocidad de laminación en torno a un 10%. En la planta de este estudio se dispone de un sistema de este tipo. En la figura 5.3 se comprueba cómo a los episodios de *chatter* les sigue una disminución sensible de la velocidad de laminado. En la figura 5.8 puede verse claramente el funcionamiento de este tipo de sistemas: para un incremento súbito de energía en la banda de *chatter* se llevará a cabo una reducción global de la velocidad de laminación en todas las cajas del tren. Además, para la bobina aquí mostrada se comprueba cómo en el último tercio fue necesario reducir la velocidad inicial de laminado para obtener una producción sin *chatter*.

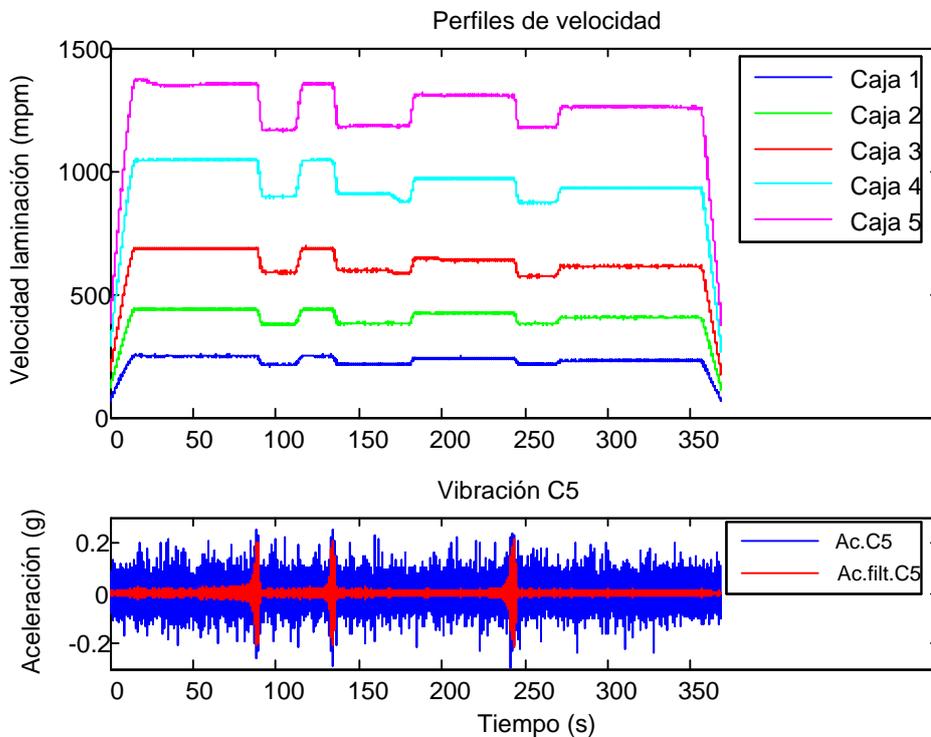


Figura 5.8: Evolución de la velocidad de laminación (arriba) en las diferentes cajas de un tren para una bobina con tres episodios de *chatter*. Nótese la reducción brusca de velocidad para los incrementos súbitos de energía en la banda de *chatter* (abajo).

Ciertos trabajos incluso proponen aumentar la velocidad de laminado ante un episodio de *chatter* para desacoplar el mecanismo de autoexcitación[31]. Para este autor no existe constancia de iniciativas como ésta, dada la peligrosidad que para la integridad de la instalación esto pudiera suponer. También todo lo contrario: como se verá en el capítulo 6, aumentar la velocidad, sin ningún otro tipo de actuación complementaria, no hará más que aumentar la inestabilidad.

Es por ello interesante observar, sobre las variables básicas capturadas, el efecto de la velocidad, a fin de relacionarlo con el carácter autoexcitado de la vibración. En primer lugar la virulencia y extremada velocidad de desarrollo del fenómeno debe servir como prueba de que no se trata de una simple vibración forzada, ya que estas características no coinciden con ningún problema conocido en el régimen de giro de elemento mecánico alguno. Por otro lado la reacción inmediata del fenómeno ante el escalón de bajada de velocidad tampoco parece coincidir con el comportamiento habitual de elementos mecánicos defectuosos, donde la frecuencia de vibración decae en consonancia con la velocidad. Además y dado el carácter autoexcitado del fenómeno, esta bajada no sería suficiente explicación, siendo ésta más propia de vibraciones forzadas que excitan una frecuencia de resonancia del sistema.

En este punto es necesario fijarse en la evolución de las variables fundamentales que conforman el ciclo de autoexcitación (espesores E/S, tensiones y fuerzas). En la figura 5.9 pueden observarse las evoluciones (en dos episodios de bobinas diferentes) de la fuerza de laminación (en este caso en el lado motor), la velocidad de laminación y la vibración filtrada en la banda del *chatter* en la caja 5, junto con la tensión entre las cajas 4 y 5 y el error de espesor medido a la salida de dicha caja (las escalas de ambas figuras son iguales). En ambas figuras 5.9(a) y 5.9(b) se percibe como la amplitud del rizado de la fuerza crece con la vibración (lógico según lo explicado sobre el ciclo de autoexcitación) y que además este crecimiento se detiene de manera súbita ante la primera señal de reducción de la velocidad (la bajada de velocidad representada en ambas figuras supone un 11 % de la velocidad de régimen). Cabe destacar también que el espesor final de la banda se resiente como se comprueba en la señal de error. En realidad el valor medio del error no varía mucho (la línea negra en el interior de esta señal se obtiene al pasarla por un filtro de medias móviles) sin embargo el rizado es mucho más abrupto e incluso a nivel visual el defecto es apreciable (ver en la figura 5.12(b) una imagen de un defecto superficial sobre una bobina dañada por vibraciones).

Más compleja es la evaluación de las tensiones, particularmente en esta última caja del tren, donde la banda emboca en una bobinadora y será por ello necesario mantener la tensión constante y con un valor bajo comparado con el nivel existente en el tren. En las figuras de 5.9, la tensión de entrada muestra comportamientos bien diferenciados: mientras en 5.9(b) la tensión sufre una importante bajada (se puede apuntar a la bajada de velocidad como causante) en 5.9(a) dicha variable no sufre modificación apreciable. Es más, en la figura 5.9(b) el comportamiento de las variables en el área central

no deja de resultar extraño, al darse, no solo una disminución de tensión con la fuerza (comprobar evolución en figura 5.7), sino que viene acompañada de una apreciable reducción en el espesor de salida.

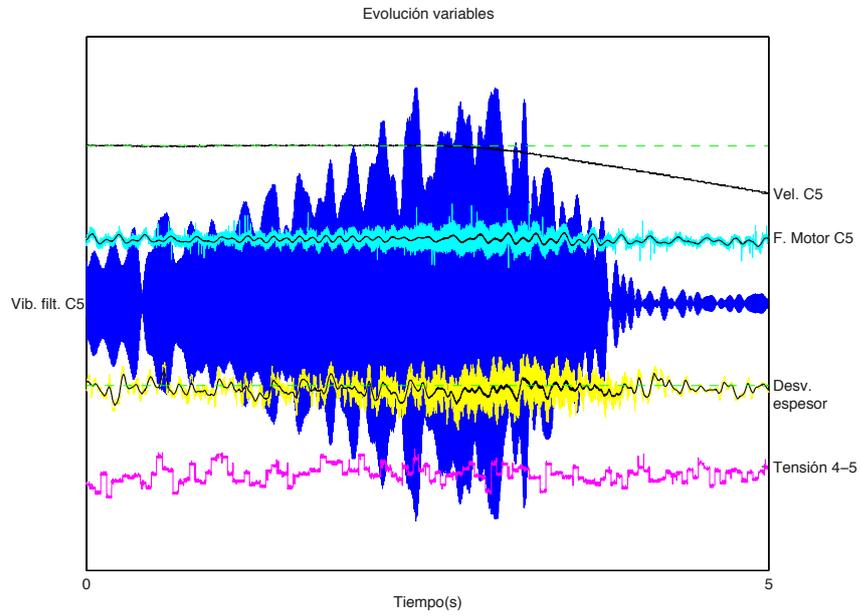
Consecuencias del *chatter* y de lo que no es *chatter*

En el entorno industrial es común confundir el fenómeno del *chatter* con vibraciones de otra índole. Lo más habitual es atribuir el *chatter* a cualquier vibración dentro del entorno de tercera octava o incluso a cualquier vibración de frecuencia media-baja. Muchas veces dicha vibración tiene un origen forzado, aunque éste suele ser también de muy difícil detección. Algunas de las características que comparten estos episodios de “falso” *chatter* pueden resumirse en:

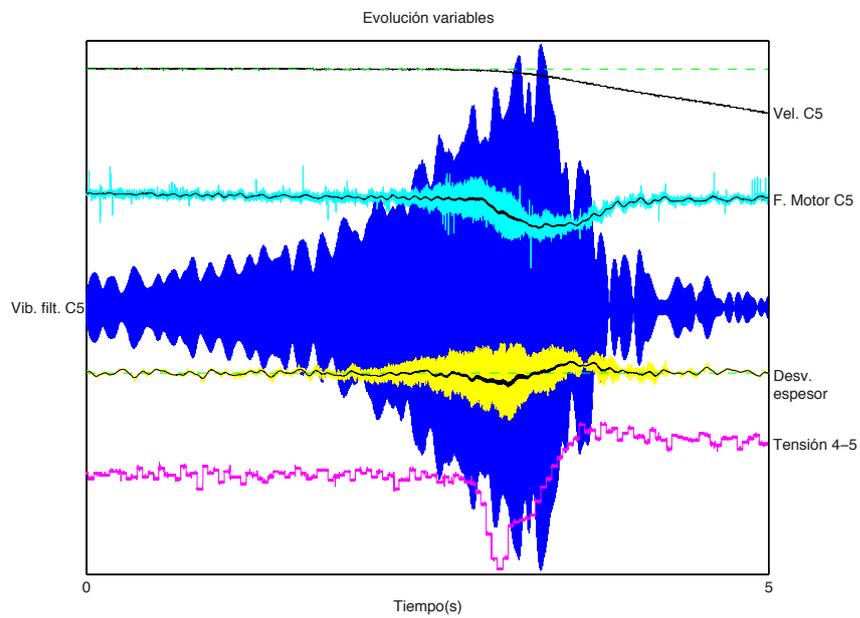
- Estos episodios no suelen ser tan violentos, es decir, no concentran tanta energía.
- Una vez iniciado el episodio se mantiene en el tiempo en el resto de la bobina e incluso en el resto de la campaña hasta que se lleve a cabo alguna modificación importante del conjunto del tren de laminación (cambio de un rodillo, acciones de mantenimiento, ...).
- No suele aparecer de manera tan repentina ni ser de carácter inestable, más bien se mantiene en un rango de valores (será proporcional a la energía de excitación).
- La vibración en sí no está restringida únicamente a la banda del *chatter*, sino que es habitual la existencia de otros armónicos importantes.

Otro aspecto digno de mención en la laminación en frío es que el *chatter* por sí mismo no dañaría los cilindros de laminación (al contrario que otras vibraciones como el denominado *faceting* o vibración en quinta octava). Esta aseveración se basa en la observación de los modos de vibración [64] del conjunto caja de laminación, ver figura 5.10. En dicho gráfico se observa como en el modo de vibración del *chatter* (número 2) los dos cilindros superiores (apoyo y trabajo superior) tienen el mismo sentido de movimiento (están en fase) al igual que los dos inferiores, sin embargo entre ambos pares (superiores e inferiores) el movimiento es opuesto (en contrafase). Ello implica que para este modo de vibración, los integrantes de cada par de cilindros en fase (apoyo y trabajo inferior o apoyo y trabajo superior) no se golpearán entre sí dado que se desplazan en el mismo sentido, mientras que sí marcarán el

material de manera periódica a través del movimiento en contrafase (pares



(a)



(b)

Figura 5.9: Evolución de la fuerza del lado motor en caja 5, vibración filtrada en la banda del *chatter* de caja 5, tiro entre caja 4 y 5 y error de espesor a la salida de caja 5, en un proceso de desaceleración debido a la aparición de dos episodios de *chatter*.

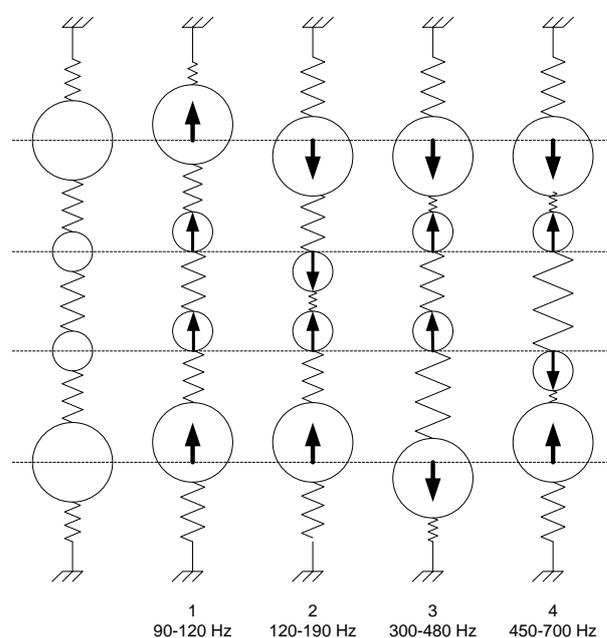


Figura 5.10: Modos de vibración de la caja de laminación. Obsérvese el número 2 *chatter* y el 4 *faceting*.

inferiores contra pares superiores), ver figura 5.12(b).

Al contrario en el modo de quinta octava o *faceting* (número 4 en figura 5.10), el movimiento de los cilindros superiores (trabajo y apoyo) es opuesto entre sí (al igual que el de los pares inferiores), provocando el golpeteo entre cilindros de trabajo y de apoyo (tanto en el par superior como en el inferior). Si además observamos el comportamiento coordinado de los pares apoyo-trabajo, se comprenderá fácilmente que estos apenas marcan el material dado que los movimientos relativos entre ellos se contrarrestan. En realidad el material sí queda marcado, pero no por el golpeteo de los cilindros debido a la vibración, sino por las marcas que al final se van conformando en la superficie de los cilindros y que se transmiten en última instancia a la banda.

En la figura 5.11 puede verse un ejemplo de un fenómeno de consecuencias similares al *chatter* pero de génesis completamente diferente (a pesar de ser un proceso de laminación en caliente resulta muy ilustrativo). La extrema dureza del material laminado desembocó en una deformación (marcas o facetas en su superficie) progresiva de los rodillos que acabaron por excitar una frecuencia cercana a la tercera octava y con ello enunciar erróneamente un

episodio de *chatter* en los análisis previos del defecto (además se cumplía el segundo punto de la síntesis anterior sobre características comunes del “falso” *chatter*).



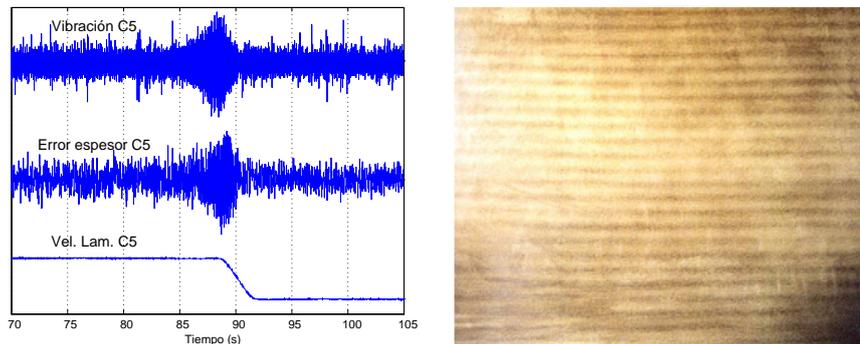
Figura 5.11: Marcas periódicas sobre cilindros de trabajo que ocasionaron una frecuencia en la banda del *chatter* (pertenecientes a un tren de laminación en caliente)[35].

Otro ejemplo de esta disparidad de criterios es el denominado efecto *brummer*, habitualmente confundido con el *chatter* [77]. Este defecto parece ser más una vibración forzada por la transmisión que una vibración autoexcitada. Habitualmente presente en torno a 110 Hz (muy cercano a la vibración de *chatter*), este fenómeno a diferencia del *chatter*, no genera un movimiento armónico inestable aunque sí de gran amplitud. Además las causas de éste tienen un origen mucho más claro que el *chatter*: los engranajes de la transmisión. En concreto los armónicos proporcionales (f_{arm}) a la frecuencia de giro de los cilindros de trabajo (f_{cilt}) a través de una constante (z), número de dientes de los engranajes de la transmisión ($f_{arm} = z \times f_{cil}$). De esta manera si alguno de estos armónicos (se identifican más de cinco grupos de engranajes en cada caja) se desarrolla dentro de las bandas típicas de resonancia del conjunto, el fenómeno *brummer*, considerado como un aumento de la energía de vibración en la banda anterior, aparece, si bien no se hará inestable ni tendrá un carácter autoexcitado.

En general la vibración de tercera octava es asumida como un mal irremediable en las plantas industriales de laminación moderna. Dado que no existe una solución que evite su aparición, los operadores tratan, en la medida de lo posible, de disminuir el impacto sobre los ratios globales de eficiencia que este fenómeno conlleva. Diversos son los impactos negativos que el *chatter* produce dentro de una línea de laminación de manera directa:

- Generación de zonas con un perfil de espesor irregular y fuera de niveles de tolerancia aceptables, ver figura 5.12(a).

- Disminución de la calidad del acabado superficial de la banda, ver figura 5.12(b).
- Roturas de banda debido a elevadas variaciones del tiro.
- Degradación de cilindros y ampuestas.
- Deterioro de elementos mecánicos por la exposición a elevados niveles de vibración.



(a) Evolución de variables en un episodio de *chatter* en la caja cinco: vibración (arriba); error de espesor a la salida (centro); velocidad de laminación (inferior). (b) Defecto de persiana por una vibración no deseada en el tren de laminación. [101]

Figura 5.12: Los efectos del *chatter* sobre la calidad del producto final son fácilmente apreciables.

Los impactos anteriores son muy perjudiciales. Sin embargo, si se reduce la velocidad a tiempo para eliminar el *chatter*, la longitud afectada por estos defectos es mínima. Desgraciadamente esta necesaria disminución de la velocidad media de laminación es el principal inconveniente que este fenómeno genera. En efecto y como se comenta anteriormente el mecanismo existente para eliminar el *chatter* (una vez iniciado) es la disminución brusca de velocidad. No sólo eso; en general y en prevención de la aparición del *chatter* (sobre todo en campañas de material crítico), es habitual laminar a una velocidad reducida. Para una línea de producción con unos costes de operación tan elevados como un tren de laminación, una disminución de la velocidad media de trabajo, como consecuencia o prevención del *chatter*, supone importantes pérdidas.

En la figura 5.8 se hacen patentes los cambios bruscos en los perfiles de velocidad y cómo, en un intento de operación libre de *chatter*, se reduce la velocidad media de laminación, finalizando el procesamiento en un nivel de

velocidad más bajo que el inicial. Un ejemplo más gráfico se encuentra en la figura 5.13, donde se observa el perfil de velocidad en un periodo de unas 4 horas con 21 bobinas procesadas. De estas, al menos 6 presentan *chatter* en su inicio (línea roja), viéndose obligados los operadores de la planta a reducir la velocidad media de laminación. Se puede comparar la velocidad media real durante ese periodo (línea verde) con la velocidad media de no haber reducido la velocidad por el *chatter* (línea rosa). En este ejemplo la velocidad se redujo en torno a un 5%.

5.1.2. Observaciones realizadas

Velocidades críticas

Varios autores proponen una única¹ frontera límite de velocidad para la cual la vibración en tercera octava se vuelve inestable y crece sin control [90][64]. La mayoría de estos trabajos están basados en simulaciones sobre modelos de diversa complejidad que tienen en cuenta el ciclo de realimentación comentado anteriormente. Otros trabajos que ya tienen en cuenta datos

¹Dependiente de las condiciones de laminación

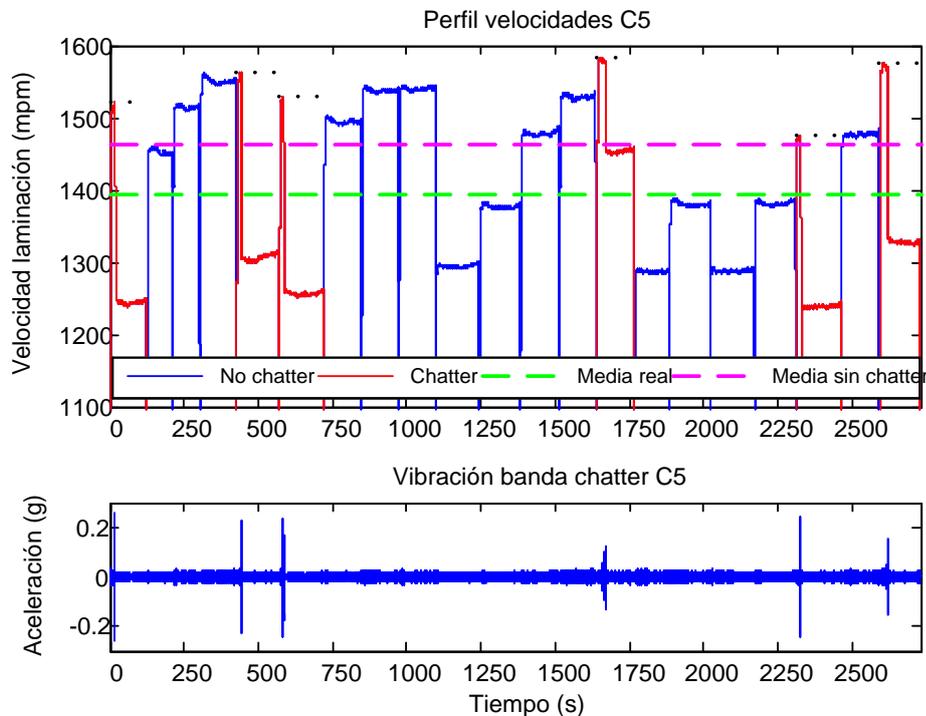


Figura 5.13: Efecto del *chatter* sobre la velocidad media de laminación en un periodo de trabajo de 4 horas con 21 bobinas procesadas.

reales toman este concepto de frontera límite de velocidad pero con ciertos matices, convirtiéndose al final en un proceso de formulación de restricciones que tracen fronteras entre zonas con y sin *chatter*.

Los datos de este estudio sin embargo no apoyan la idea de un umbral de velocidad (con este grado de simplicidad al menos). Se ha podido observar como las velocidades de laminación a las que comienza el *chatter* son bastante variables y no guardan una relación que permita deducir valores límite de velocidad, sin tener en cuenta otros factores.

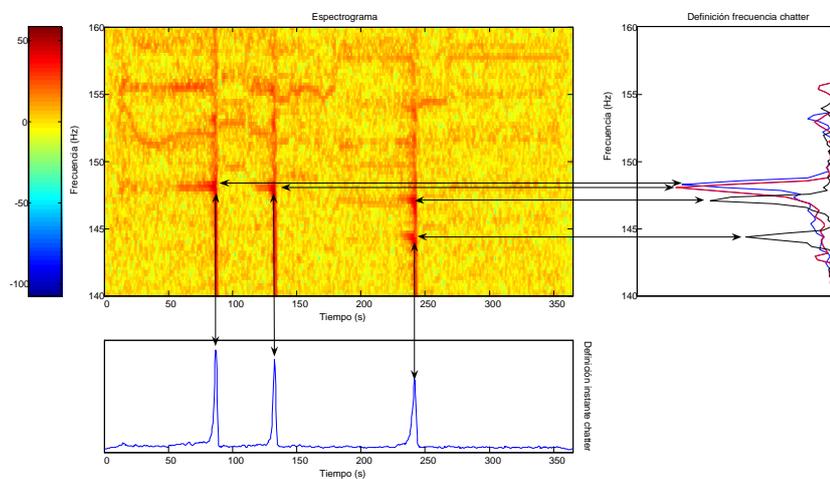


Figura 5.14: Esquema simplificado del algoritmo de identificación de frecuencias. Los máximos en el tiempo de la energía media en la banda de 140-160 Hz definen el instante de *chatter*. Para un pequeño entorno en ese instante, los máximos en la banda de frecuencias anterior definen la frecuencia exacta de ese episodio de *chatter*.

Fue diseñado un algoritmo para la definición del instante y frecuencia exacta, de aparición del *chatter* en este estudio. La distribución de energía dentro de la banda en estudio, fue el criterio para dicha definición. De esta manera para los armónicos dentro de la banda de 140-160 Hz se calculó la cantidad de energía presente en cada instante. La media posterior, para cada instante de tiempo, de toda esa energía en el intervalo de frecuencias, sirvió para, a través de la selección de sus máximos, definir el instante de tiempo exacto (ver figura 5.14 en el gráfico inferior). Tomando después un pequeño entorno en ese instante se seleccionaron los máximos de energía para cada frecuencia de ese intervalo (ver figura 5.14 en el gráfico de la derecha). Este mecanismo permitió definir con exactitud la frecuencia e instante de aparición del *chatter* para el conjunto de datos reales disponibles. Destacar que las características de la FFT utilizada permitió una resolución en los

armónicos considerados de 0.24 Hz.

En concreto se han recopilado los valores de la frecuencia exacta de *chatter* y de la velocidad de laminación (el valor medio en los 5 segundos previos al fenómeno), para alrededor de 500 episodios de *chatter*. En la figura 5.15(a) puede observarse la distribución de dichas velocidades previas (interesante la confrontación con la distribución de frecuencias de *chatter* en la figura 5.2). En la figura 5.15(b) se representa la función de densidad estimada de la distribución de los pares frecuencia *chatter*-velocidad de laminación. Dicha función se asemeja a una distribución normal, lo que lleva a pensar que no existe una relación directa entre la velocidad a la que se forma y la frecuencia misma del *chatter*. En realidad de haber una frontera crítica de velocidad esta no tendría que corresponder con la velocidad observada y aquí representada. De hecho cabría esperar que ese umbral fuera menor que la velocidad aquí recogida ya que en el instante de formación del *chatter* el sistema será inestable y por tanto ya se habrá traspasado la velocidad crítica. Sin embargo y dada la alta velocidad de génesis del fenómeno estos niveles de velocidad crítica no deberán estar muy alejados de los aquí recogidos, siendo por tanto las apreciaciones anteriores muy ilustrativas del concepto de velocidad crítica.

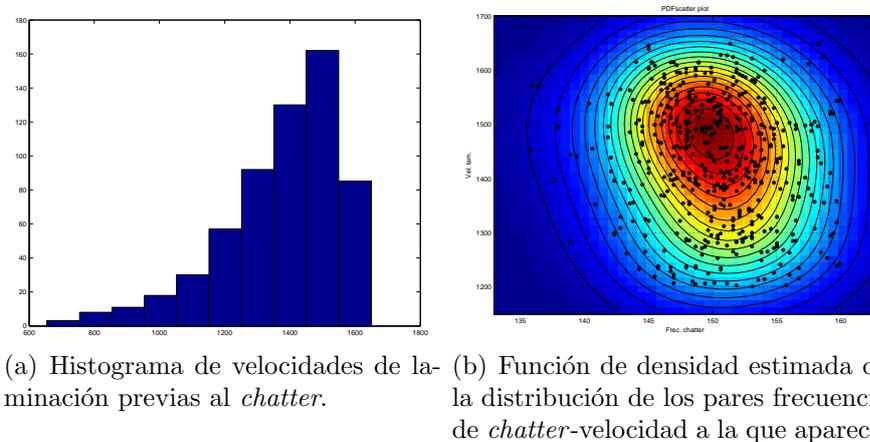


Figura 5.15: El concepto de velocidad frontera para el origen del *chatter* no se puede aplicar directamente sobre los datos reales del estudio.

Comportamiento de otras variables

Como se comenta en la sección anterior, sobre el ciclo autoexcitado del *chatter*, diversas variables reflejan este curioso fenómeno. Las variaciones de tensión en los extremos del área de mordida modifican el balance de fuerzas de esa zona donde tensión, fuerza de laminado y dureza del material se

encuentran equilibrados. De estos tres, la dureza del material puede considerarse invariable, siendo ésta casi sólo sensible a los cambios de reducción pronunciados. En la figura 5.16 se observa el espectrograma de la señal de fuerza de los cilindros hidráulicos, tanto en el lado motor como en el lado operador. Ésta presenta un comportamiento, en cuanto a incremento súbito de energía, similar al recogido por los acelerómetros, con un elevado contenido frecuencial en la banda del *chatter*.

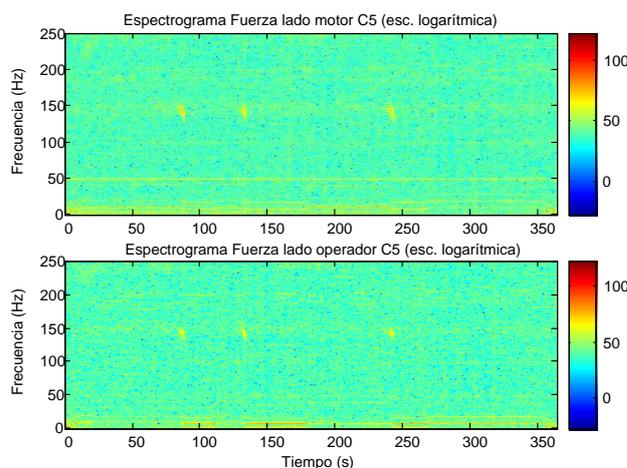


Figura 5.16: Evolución del contenido frecuencial de la fuerza de laminación en una bobina con *chatter*. Nótese el aspecto de la distribución de energías similar al de la variable vibración (concentración en una banda específica y aparición súbita).

Otro de los integrantes fundamentales del ciclo de autoexcitación es el espesor de entrada/salida. Es por ello útil la observación de la evolución del mismo. En este caso se representa el contenido frecuencial de la señal de error generada por una galga de rayos X a la salida de la caja 5, ver figura 5.17. Se observa como el error aportado en los episodios de *chatter* es perceptible pero apenas modifica el perfil de espesor al estar concentrado en estrechas franjas dentro de la longitud de la banda, además el espectrograma arroja claras similitudes con las señales anteriores (concentración en una frecuencia determinada y aparición súbita).

Por último es necesario analizar las tensiones de entrada y salida para observar por completo el comportamiento del ciclo autoexcitado. Sin embargo este estudio no ha podido lograr disponer de lecturas de tensiones a una frecuencia de muestreo suficiente para observar el *chatter*. En la figura 5.18 se observa el aspecto de la señal de tensión y como, a pesar de disponer de

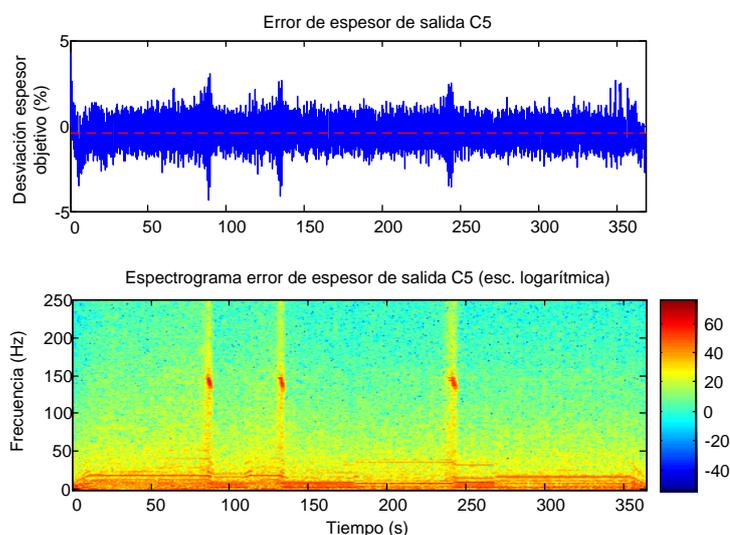


Figura 5.17: Evolución del contenido frecuencial del error de espesor en una bobina con *chatter*. Evolución temporal (arriba) donde se aprecia el fenómeno y evolución frecuencial.

una tasa de captura de 2 kHz, la misma parece presentar un muestreo de alrededor de 25 Hz. El estudio en conjunto de fuerza y tensión puede arrojar bastante luz a la aparición de este fenómeno ya que, como en [89] y en otros trabajos, los desfases entre las diferentes variables en juego (en especial fuerza y tensión) son fundamentales para el desencadenamiento del fenómeno.

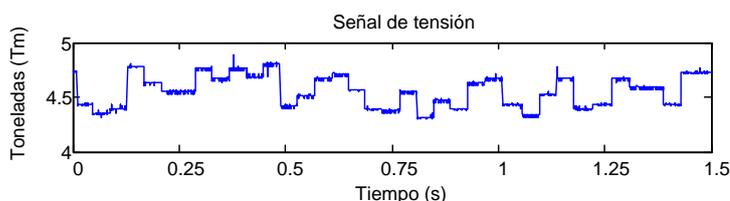


Figura 5.18: Aspecto de la señal de tensión capturada a 2 kHz.

Interacción entre cajas

Una de las grandes diferencias de los estudios acerca del *chatter* en un laboratorio y sobre una planta real de laminación en frío es sin duda el número de cajas en juego. Los equipamientos de laboratorio suelen incluir una sola caja de laminación a escala bajo unas condiciones controladas, mientras que en un entorno real se dispone de varias cajas reales (4-5) dispuestas en cascada. Obviamente es muy difícil recoger las interacciones mutuas entre cajas

a nivel de laboratorio, siendo las experiencias con datos reales las únicas que pueden brindar una visión global del problema.

Siguiendo esta línea es interesante trazar el origen del *chatter* dentro de las cajas de laminación existentes. En este ámbito los trabajos de [75] y de [10] tratan de responder a esta pregunta y son referencias clásicas del problema. A nivel industrial el problema de las vibraciones crece en importancia aguas abajo del proceso. En la instalación que nos ocupa, la energía de vibración del tren comienza a ser tenida en cuenta a partir de la tercera caja. Esto es debido a varias cuestiones fundamentales. La primera es sin duda que la calidad final (superficial y en espesor) vendrá altamente condicionada por el desarrollo de la laminación en estas últimas caja (una muesca de un rodillo de trabajo de la última caja puede estropear el acabado superficial de una bobina perfectamente laminada). También parece claro que algunas desviaciones importantes del espesor en las primeras cajas aún tendrán tiempo y espacio suficientes para ser subsanadas. Es obvio además que una vibración de una determinada amplitud afectará más a la calidad del espesor de un material fino (propio de las últimas cajas) que de uno con mayor espesor medio. Por último y más importante es el aumento del grado de reducción total al que la banda se ve sometida gradualmente: el aumento de reducción total del material implica el aumento de su límite de elasticidad y fluencia, denominado endurecimiento por deformación en frío. Es decir, serán necesarias mayores cargas para mantener niveles de reducción similares. Es por ello que se puede decir que la laminación se hace más extrema con el devenir del material por las diferentes cajas. Este endurecimiento repercute en el ciclo de autoexcitación reduciendo la capacidad del material de absorber las vibraciones y por ello eliminando amortiguamiento en el sistema.

Sea lo que fuere y según los experimentos llevados a cabo, el fenómeno del *chatter* se hace patente en las tres últimas cajas, siendo apenas perceptible en las anteriores. En la figura 5.19 es fácil observar como la vibración durante los instantes de *chatter* es inapreciable en las dos primeras cajas (aguas arriba) a la vez que alcanza su máxima expresión en la última caja.

En los estudios que con datos reales se llevan a cabo, es habitual centrarse en una de las cajas de laminación (habitualmente la piloto utilizada como referencia en las acciones de control) para llevar a cabo todas las experiencias. Sin embargo no hay muchas experiencias sobre cuál es la caja donde se origina el *chatter* o sobre los posibles mecanismos de transmisión. Diversos autores apuntan estas causas de transmisión del *chatter*, confrontar [10]. Según el ciclo de autoexcitación comentado anteriormente, existirían dos mecanismos

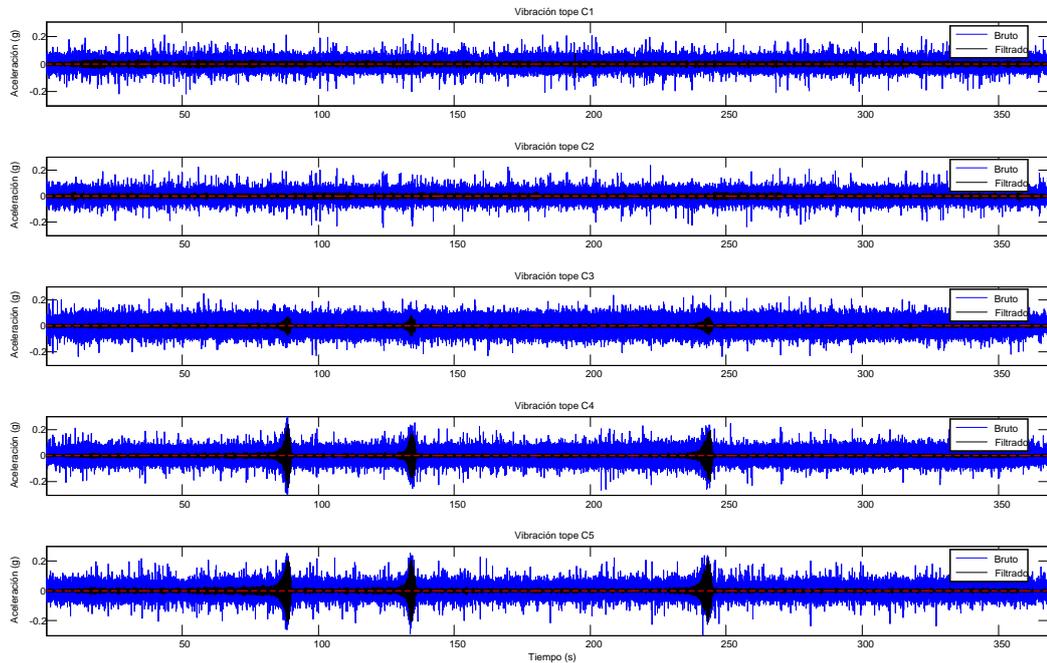


Figura 5.19: Evolución temporal de la vibración en las cinco cajas de laminación, la señal en bruto y filtrada en la banda del *chatter*. Nótese como la intensidad del *chatter* aumenta aguas abajo, siendo apenas perceptible en las dos primeras cajas (Nota: La escala del eje vertical es la misma para todas las cajas).

para la transmisión del fenómeno *chatter* a las demás cajas de laminación, ver figura 5.20. Por un lado habría una transmisión aguas abajo a través de los cambios en el espesor de salida de alguna de las cajas, que serán tomadas por la siguiente, iniciando el proceso de vibración. Este mecanismo sin embargo poseerá un retardo, la variación de espesor debe recorrer el espacio entre cajas a una velocidad dada (será un retardo perceptible y calculable a partir de la velocidad de laminación). El otro mecanismo transmitiría el *chatter* aguas arriba a través de las variaciones de tensión. Obviamente y dado un material continuo y homogéneo en el espacio intercaja, variaciones de tensiones de entrada en una caja serán traducidas por variaciones de tensión de salida en la caja anterior. La particularidad de este fenómeno estriba en que sería prácticamente instantáneo, siendo por tanto la transmisión aguas arriba casi automática.

Los análisis llevados a cabo en este estudio apuntan a que es en la caja número cinco (la última) donde el *chatter* se produce inicialmente, utilizando el segundo sistema de transmisión, aguas arriba a través de los cambios de tensión, para su contagio a otras cajas. Esta idea se apoya en el hecho de que

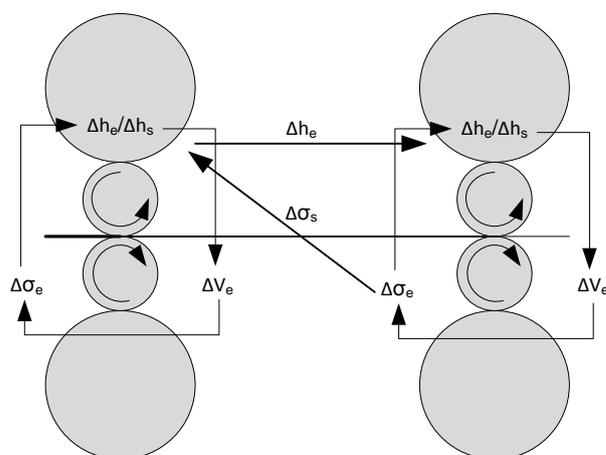


Figura 5.20: Dos tipos de interacción entre cajas: una “hacia adelante” a través de las variaciones de espesor con un retardo en una transmisión y otra “hacia atrás” a través de variaciones de tiro de manera instantánea.

el *chatter* prácticamente se inicia en las tres últimas cajas a la vez (figura 5.21), y dados los mecanismos de transmisión explicados, este fenómeno solo puede deberse a un inicio en la caja cinco y una transmisión hacia atrás.

El plano frecuencial

La visualización de espectrogramas es una herramienta muy potente a la hora de observar, de manera global, el comportamiento de una serie de frecuencias en un periodo de tiempo. A través de esta herramienta es posible visualizar episodios de *chatter* con el fin de ilustrar la complejidad de su comportamiento. La figura 5.22 muestra espectrogramas temporales, de la señal de vibración en la caja cinco, en diferentes bobinas manteniendo en todas la misma escala de colores y rango de frecuencias. Un primer acercamiento al *chatter* lleva a pensar en un estado inestable del tren motivado por un exceso de velocidad de laminación. Es decir, sobrepasada una velocidad crítica este fenómeno se vuelve inestable como se ilustra perfectamente en la figura 5.22(a). Otro caso habitual es la generación del *chatter* a una velocidad elevada para lo cual será necesario reducir la velocidad media de laminación, ver figura 5.22(b). Sin embargo esta idea simple de un “exceso” de velocidad puede abandonarse pronto a la vista de múltiples ejemplos, en la figura 5.22(c) se observa como la velocidad crítica de aparición del *chatter* se mantiene después de la primera deceleración y hasta el final de la laminación, sin que después se vuelva a generar dicho fenómeno.

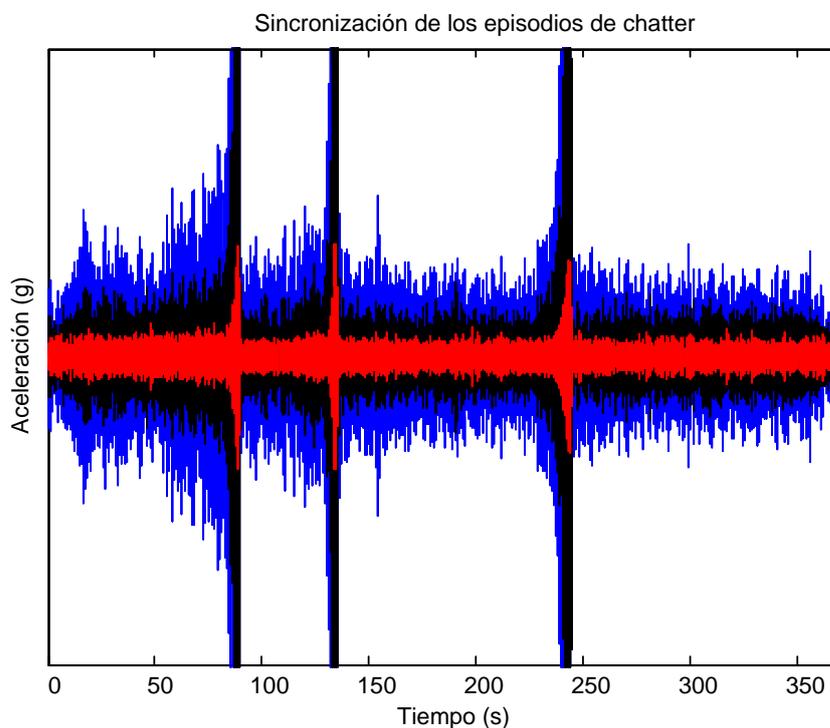


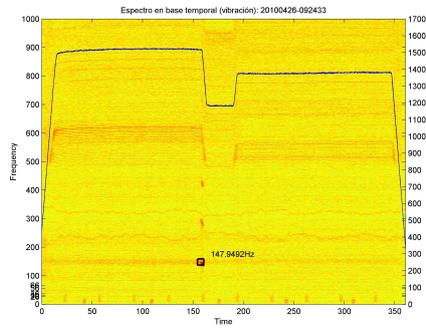
Figura 5.21: Representación simultánea de los episodios de *chatter*. La señal filtrada en la banda del *chatter* de la caja 5 (azul) se superpone con las de la caja 4 (negro) y 3 (rojo) para comprobar el orden de inicio (Nota: Las escalas del eje de ordenadas son relativas a cada señal para facilitar la representación).

Sin embargo parece claro que la bajada de velocidad es la única arma eficaz en la lucha contra esta vibración, en la figura 5.22(d) es fácil ver como tras dos episodios diferentes de *chatter* solo es posible finalizar la laminación a través de una importante bajada del régimen. El *chatter* parece también independiente del contenido global de energía de la vibración. En la figura 5.22(e) puede observarse una bobina laminada con alto contenido frecuencial global (elevada tasa de tonos rojos en comparación con el resto) en la que aparece *chatter*. Aparecen también con cierta frecuencia múltiples episodios de *chatter* en una misma bobina (figura 5.22(d) y 5.22(e)), e incluso algunas laminaciones con un comportamiento frecuencial ciertamente caótico (figura 5.22(f)).

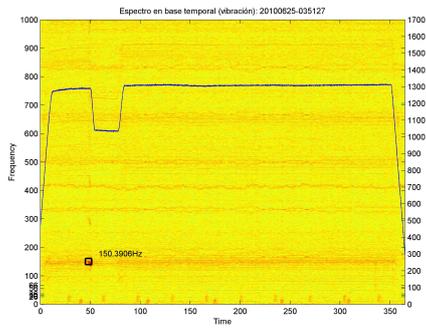
La representación de secuencias de bobinas, inmediatas en el tiempo, donde alguna contenga un episodio de *chatter*, resulta interesante por si existiera algún armónico forzado debido al deterioro de alguna pieza que además fuera fortaleciéndose con el tiempo o al menos para comparar de un vistazo el



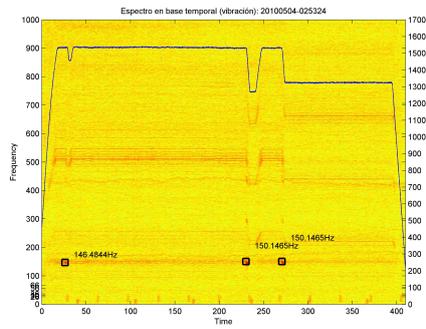
(a)



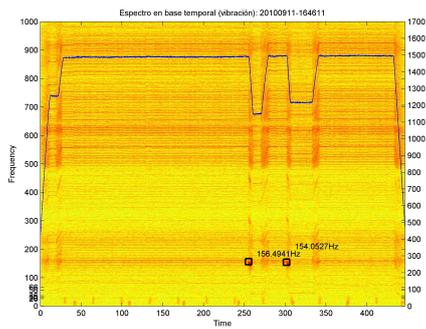
(b)



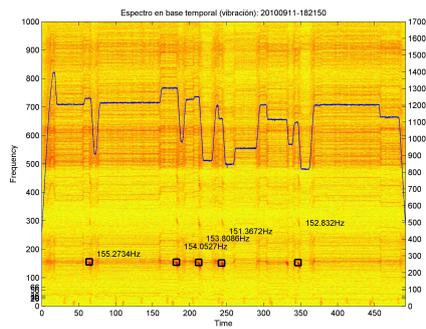
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.22: Ejemplos ilustrativos del fenómeno *chatter*.

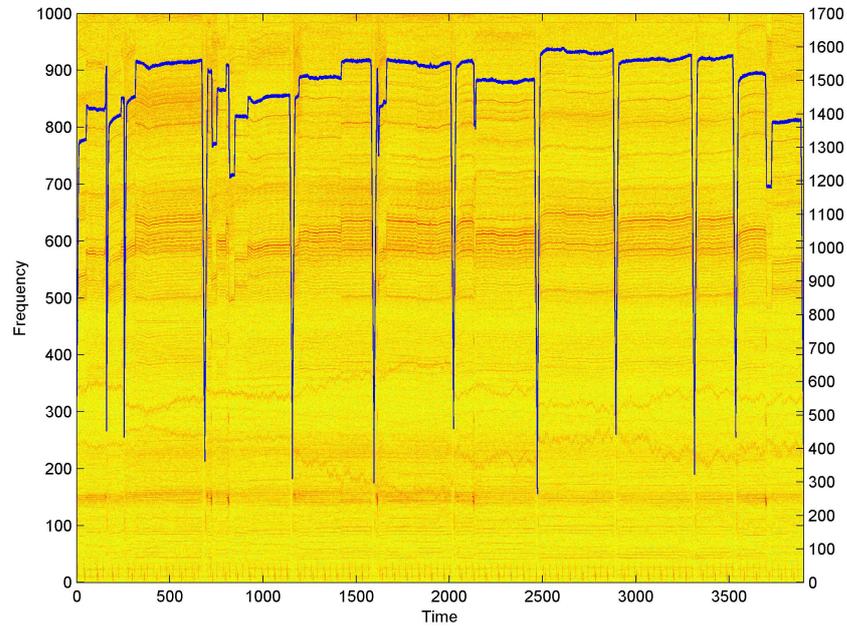


Figura 5.23: Espectrograma de la señal de vibración de la caja 5 para un conjunto de bobinas seguidas en el tiempo y con varios episodios de *chatter*.

aspecto de la distribución de frecuencias en cada bobina. En la figura 5.23 es posible observar un conjunto de bobinas seguidas con varios episodios de *chatter*. Nótese la dependencia no directa del fenómeno con la velocidad de laminación, así como la aparición de armónicos, de manera aleatoria, en unas y otras bobinas.

Capítulo 6

Modelado teórico del proceso de formación del *chatter*

6.1. El ciclo de autoexcitación del *chatter*

6.1.1. Introducción

Se conoce al fenómeno del *chatter* como una vibración autoexcitada dentro del rango de frecuencias de tercera octava. El carácter autoexcitado implica la ausencia de una fuente externa de energía, origen de la vibración. Es decir, la propia dinámica o movimiento del sistema aporta la energía que lo sustenta. Este complejo mecanismo requiere un estudio en profundidad para alumbrar las peculiaridades del mismo. En este capítulo se trata de componer un modelo tal, que simule el fenómeno del *chatter* en unas condiciones similares a las encontradas en la planta real, de tal manera que sea posible llevar a cabo un estudio en profundidad sobre la aportación de ciertos parámetros a la estabilidad del sistema.

El proceso de laminación en frío puede entenderse como la interacción de dos sistemas: el formado por el material laminado y el propio mecanismo de laminación. Ambos grandes subsistemas tendrán sus propias particularidades, siendo su integración y trabajo conjunto lo que dicta el estado dinámico del tren tándem. En este sentido será necesaria la definición, por un lado, de un modelo que describa el proceso mismo de deformación y que ponga en juego parámetros tales como fuerzas de apriete, tensiones, ... y por otro, un modelo que describa la dinámica propia de la caja de laminación, contemplando la respuesta de la misma ante las variaciones del equilibrio caja-material producidas durante el proceso.

6.1.2. El proceso de laminado

Varios han sido los intentos de condensar en una sola expresión y de una manera sencilla, las peculiaridades del proceso de laminación en frío, ver capítulo 3. Von Karman [103] en 1925 puede decirse que inaugura la actual teoría de laminación. Las simplificaciones establecidas así como las ideas fundamentales de su trabajo fueron adoptadas, desde entonces, por todos los autores cercanos a esta materia. Orowan en [73] abandona algunas de las tesis de Von Karman, componiendo un nuevo modelo de laminación más sofisticado y complejo pero mucho más fiel a la realidad. Ambos autores sientan las bases de lo que será el desarrollo futuro de la tecnología de laminación. Los modelos de ambos autores son de difícil resolución, incluyendo elementos de cálculo diferencial. Esta característica los hace de difícil uso en un entorno industrial, debido sobre todo a las limitaciones de cálculo en tiempo real. Por ello, y paralelamente al desarrollo de estos modelos, otros importantes autores desarrollaron mecanismos y simplificaciones orientados a una resolución rápida, elevando con ello la utilidad de los mismos. Desde la confección de métodos gráficos [91][92] en los primeros años, a la formulación de modelos aproximados cuyas simplificaciones hacen más simple la operativa del modelo [6], muchos han sido los intentos para encontrar representaciones del proceso que aunaran exactitud y facilidad de uso.

En una planta de laminación real es necesario conocer de antemano los requerimientos mecánicos y eléctricos para unas condiciones de laminación dadas. Con esta finalidad, multitud de autores han desarrollado expresiones algebraicas simples para el cálculo de la fuerza (F) y del par de laminación (T), atendiendo a los complejos modelos anteriores. Estas aproximaciones son función de los parámetros básicos de laminación (6.1), donde aparecen (en orden): las tensiones de entrada y salida; el espesor inicial de la banda a la entrada del tren (a fin de establecer el incremento en el grado de dureza alcanzado durante el proceso de laminación); los espesores a la entrada y a la salida de la caja en estudio; el ancho; el coeficiente de rozamiento banda-cilindro y la evolución del límite elástico de la banda según el proceso de deformación en frío aplicado.

$$F = f(\sigma_e, \sigma_s, h_0, h_e, h_s, w, \mu, S) \quad (6.1)$$

En [87] puede encontrarse la siguiente expresión para el cálculo de la fuerza basada en las simplificaciones de Bland y Ford [6] y Hill [47] sobre el modelo inicial de Orowan y posteriormente utilizado en [66] para la simula-

ción de un tren tándem:

$$F = w\chi\bar{S}\sqrt{R_m(h_e - h_s)}D_r \quad (6.2a)$$

$$D_r = 1,08 + 1,79r\sqrt{1 - r\mu}\sqrt{\frac{R_m}{h_s}} - 1,02r \quad (6.2b)$$

$$\chi = 1 - \frac{(\alpha - 1)\sigma_e + \sigma_s}{\alpha\bar{S}} \quad (6.2c)$$

$$\bar{S} = \alpha(\bar{r} + \beta)^\gamma \quad (6.2d)$$

$$\bar{r} = 0,4r_e + 0,6r_s \quad (6.2e)$$

donde $\alpha = 1/r$, $r_e = 1 - \frac{h_e}{h_0}$, $r_s = 1 - \frac{h_s}{h_0}$, R_m es el radio equivalente según Hitchcock (3.1) y los términos β y γ son coeficientes para modelar la curva de endurecimiento por deformación en frío del material.

Bryant y Osborn en [7] exponen una nueva estimación de la fuerza específica de laminación a partir de las teorías de [33]:

$$P = \frac{P_0}{1 - 0,4aB_0 - bP_0} \quad (6.3a)$$

$$P_0 = (\bar{S} - \bar{\sigma})\sqrt{R\delta}(1 + 0,4\alpha_0) + P_{E0} \quad (6.3b)$$

$$\alpha_0 = \sqrt{\frac{h_s}{h_e}}e^{\frac{\mu\sqrt{R\delta}}{h}} - 1 \quad (6.3c)$$

$$P_{E0} = \frac{2}{3}(S_s - \sigma_s)^{1,5}\sqrt{\frac{Rh_s(1 - \nu_B^2)}{E_B}} \quad (6.3d)$$

$$a = 1,4\sqrt{\frac{h_s}{h_e}}\left(\frac{\mu}{\bar{h}}\right)^2 Rc \quad (6.3e)$$

$$b = \frac{c}{2\delta} - \frac{P_0}{2}\left(\frac{c}{2\delta}\right)^2 \quad (6.3f)$$

$$B_0 = (\bar{S} - \bar{\sigma})\sqrt{R\delta} \quad (6.3g)$$

$$c = \frac{4(1 - \nu_R^2)}{\pi E_R} \quad (6.3h)$$

donde $\delta = h_e - h_s$, $\bar{h} = \lambda_1 h_e + (1 - \lambda_1)h_s$, $\bar{\sigma} = \lambda_2 \sigma_e + (1 - \lambda_2)\sigma_s$, $\bar{S} = \lambda_3 S_e + (1 - \lambda_3)S_s$ y R es el radio original del cilindro. Los términos λ_1 , λ_2 y

λ_3 son constantes que ajustan el espesor, tensión y dureza del material por término medio en la mordida. Además se distingue entre el módulo elástico y coeficiente de Poisson de banda (E_B, ν_B) y rodillo (E_R, ν_R). Por último S_e y S_s serán los términos de dureza del material (límite elástico) a la entrada y la salida de la caja, teniendo en cuenta el proceso de endurecimiento en frío.

El término P_{E0} de la ecuación 6.3 puede considerarse casi despreciable respecto al término general P_0 . En [79] se describe dicho método de manera simplificada si bien se utiliza el radio modificado de Hitchcock [48] y se toma como fuerza específica final el término P_0 (tampoco se tiene en cuenta P_{E0}). Además de éstas, muchas otras expresiones se han formulado para el cálculo de la fuerza de laminación; utilizando cualquiera de ellas será posible obtener una expresión explícita de la misma.

En la figura 6.1 puede verse la fuerza estimada según los tres métodos anteriores para tres puntos de funcionamiento de diferentes bobinas. El coeficiente de rozamiento μ se ha calculado para cada uno de los tres puntos de funcionamiento a través de la expresión de Hill. Nótese como el modelo de Bryant y Osborn simplificado parece ser el más cercano al valor real en varios de los puntos contemplados. Además este modelo es el de más fácil manejo y operatividad, por estas razones se seleccionó para su uso posterior en el cálculo de los diversos coeficientes utilizados.

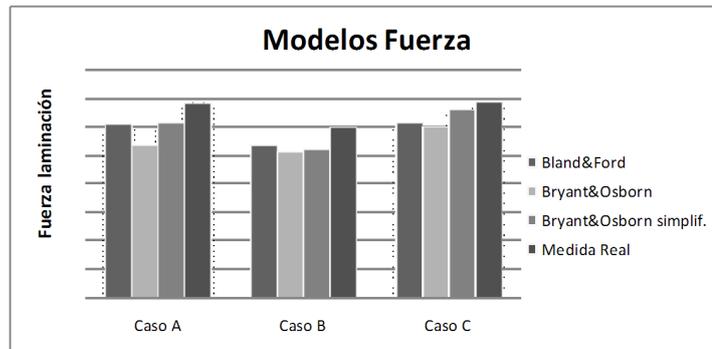


Figura 6.1: Comparativa para tres puntos de funcionamiento distinto de la fuerza calculada a través de los métodos anteriores con la real.

6.1.3. La caja de laminación

Con el fin de modelar la dinámica de la caja de laminación se toma ésta como un sistema masa-muelle-amortiguador, con todos sus elementos moviéndose en la misma dirección principal (perpendicular a la banda). Para

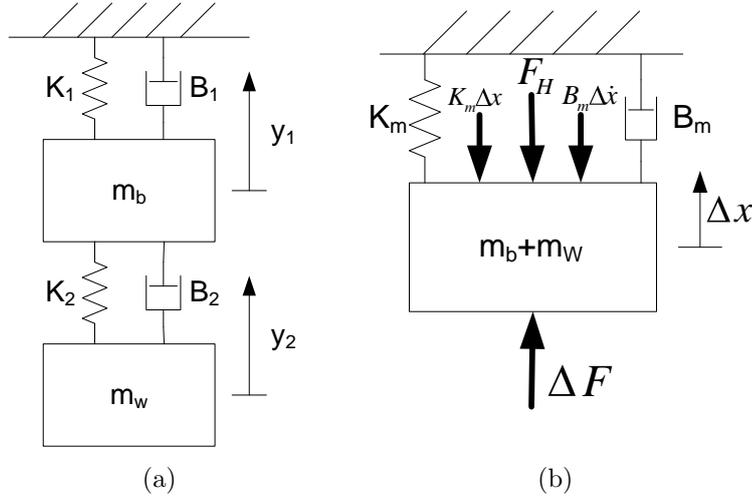


Figura 6.2: Modelo simplificado de una caja cuarta (a) y el utilizado para el estudio de la vibración de tercera octava (b).

una mayor simplificación el par de cilindros inferior se consideran fijos, sin movimiento vertical, permitiendo una simplificación del sistema. Esta hipótesis es rebatida por algunos autores [74] si bien es ampliamente reconocida y utilizada. De esta manera, las fuerzas debidas a la deformación elástica del castillete y cilindros y el contacto entre material y cilindros están modelados a través de la rigidez y amortiguación de los elementos anteriores.

Una caja cuarta supuesta a vibrar en una dirección principal perpendicular al flujo de material de la banda y cuya vibración sea simétrica respecto al material procesado puede ser representado como un sistema de cuarto orden. Un esquema de esta configuración puede verse en 6.2(a), donde las masas hacen referencia a los rodillos de apoyo (m_b) y trabajo (m_w) y las constantes de elasticidad (K 's) y amortiguamiento (B 's) dependerán de las características constructivas de la caja. Una de las peculiaridades del modo de vibración del *chatter* es que ambos cilindros se moverán en el mismo sentido. Aprovechando esta peculiaridad es posible juntar en un mismo cuerpo ambos cilindros simplificando el modelo en gran medida. En la figura 6.2(b) se muestra este modelo simplificado que atenderá a la siguiente ecuación de movimiento (6.4):

$$M\Delta\ddot{x} = \Delta F - \Delta F_H - K_m\Delta x - B_m\Delta\dot{x} \quad (6.4)$$

donde M será la masa conjunta del cilindro de trabajo y apoyo (o en general de todos los elementos que están en movimiento con los cilindros superiores), K_m la constante elástica del sistema y B_m la de amortiguamiento; mientras

que Δx hace referencia al movimiento de los cilindros y ΔF_H y ΔF a las fuerzas aplicadas por el sistema hidráulico y por la banda sobre el paquete de cilindros respectivamente.

Los modelos de caja de laminación empleados en la literatura pueden clasificarse por su complejidad. Así [113] plantea en uno de sus modelos un sistema con varios modos de vibración dispuestos de manera perpendicular; en [11] se define un sistema asimétrico donde se tiene en cuenta los cuatro rodillos de la caja así como sus diversos muelles y amortiguadores asociados (elevado número de grados de libertad); similar esquema sigue [54] donde se tiene en cuenta las masas de todos los rodillos en juego aunque eliminando los amortiguadores; muchos otros autores suponen simetría entre el conjunto superior e inferior de la caja y solo toman una parte (dos rodillos) [105]; por último un modelo simplificado como el de este trabajo es también empleado en [113].

Un factor crítico y fundamental es el mecanismo de apriete que otorga la fuerza de laminación. Las primeras instalaciones así como los trenes experimentales poseen sistemas de apriete mediante tornillo. Este mecanismo es simple y ampliamente utilizado. Sin embargo y debido a la mayor precisión de los sistemas hidráulicos, aquellos se han visto desplazados por mecanismos de apriete mediante cilindros y pistones. Las instalaciones industriales más modernas (como la que utiliza este trabajo) poseen ya estos sistemas, pero apenas existen experiencias con este tipo de equipamiento [105]. Este hecho hace que varios de los parámetros fundamentales, en especial el término B_m de amortiguación, difieran de los términos utilizados en otros trabajos. No sólo hay que considerar que es una planta industrial real (en contrapunto a trenes mucho más pequeños en un laboratorio) o que el modelo de caja está altamente simplificado (traduciendo la dinámica de la caja a un conjunto muy reducido de parámetros) sino que también el sistema de apriete es hidráulico, diferente a los habituales por tornillo.

6.1.4. El modelo del ciclo de autoexcitación

Como se expone en la sección 5.1.1, el fenómeno del *chatter* en un tren de laminación resulta de la interacción entre el sistema formado por la caja de laminación y el material procesado. Tomando este comportamiento en conjunto, es posible componer un ciclo que aúne la dinámica de la caja de laminación (en forma de un sistema de segundo orden) con el proceso de laminado. Se han llevado a cabo varias simplificaciones para la confección de

este modelo lineal: se toman las reconocidas simplificaciones de Tlustý [90], $\Delta h_e = 0$ y $\Delta V_s = 0$; también se considera que el punto neutro coincide con el plano de salida de la banda ($V_R = V_s$) y que además dicho plano coincide con el centro de los rodillos. De esta manera es posible construir un modelo simple de formación del *chatter* para una caja de laminación, que tenga como entrada una variación de la fuerza de apriete (ΔF_H) y como salida la variación del espesor de salida (Δh_s). En la figura 6.3 se esquematiza la configuración de este modelo del ciclo de formación del *chatter*. En el mismo, las derivadas parciales $\left. \frac{\partial F}{\partial h_s} \right|_0$ y $\left. \frac{\partial F}{\partial \sigma_e} \right|_0$ representan los cambios sobre la fuerza ejercida por la banda sobre el cilindro de trabajo que el espesor de salida y la tensión de entrada producen para un punto de funcionamiento dados, comprobar la linealización en las expresiones (5.4); el término E y L hacen referencia al módulo elástico del material y la distancia entre cajas y están dentro del término que calcula la variación de tensión de entrada según los cambios de velocidad (5.3); los términos V_{s_0} y h_{e_0} serán la velocidad de salida y el espesor de entrada para unas condiciones de funcionamiento dadas y están relacionados con la ecuación de continuidad (5.1).

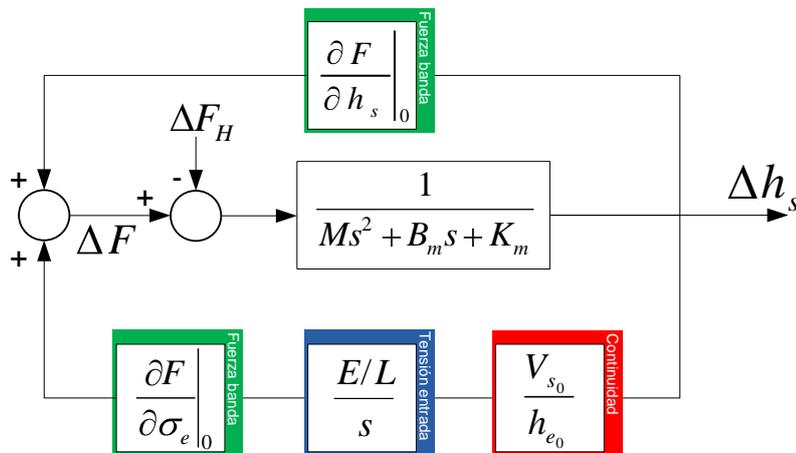


Figura 6.3: Modelo de formación del *chatter*.

De la capacidad del sistema realimentado de amortiguar estas variaciones de fuerza y espesor dependerá la estabilidad del lazo y por tanto la aparición del mecanismo autoexcitado del *chatter*. Dicho amortiguamiento será dependiente de los múltiples parámetros presentes en la laminación: desde características de elementos constructivos del tren (castillete, rodillos, ...) hasta el estado de rozamiento y lubricación en el área de mordida, teniendo en cuenta por supuesto la velocidad de laminación.

6.2. Estudio de la estabilidad del sistema de laminación

El ciclo autoexcitado anterior, ver figura 6.3, tiene la siguiente función de transferencia:

$$\frac{\Delta h_s(s)}{\Delta F_H(s)} = \frac{-Lh_{e_0}s}{MLh_{e_0}s^3 + B_m Lh_{e_0}s^2 + (K_m - K_s)Lh_{e_0}s - K_t EV_{s_0}} \quad (6.5)$$

donde los términos K_t y K_s serán el valor para un punto de funcionamiento dado de las derivadas parciales $\frac{\partial F}{\partial \sigma_e}$ y $\frac{\partial F}{\partial h_s}$. Dichas derivadas serán calculadas a través de los modelos anteriores sobre el proceso de laminado (ver sección 6.1.2), de ahí la importancia de seleccionar el más adecuado para la configuración de la planta real en estudio. El resto de parámetros serán propios de las características constructivas de la caja de laminación.

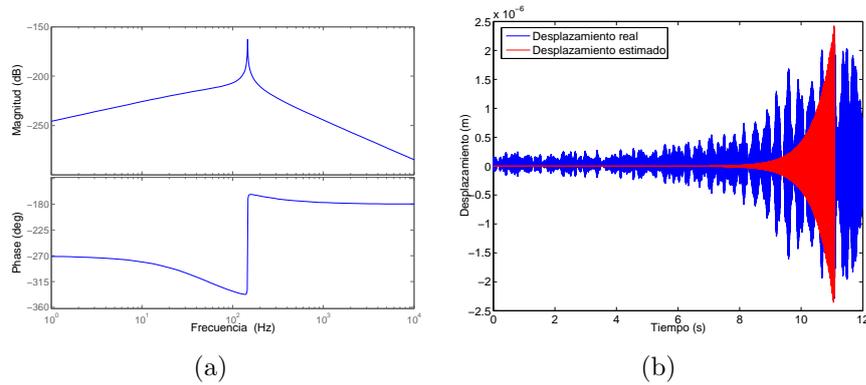


Figura 6.4: Respuesta frecuencial (a) y temporal (b) del modelo.

Por lo tanto el estudio de la aparición del *chatter* será equivalente al estudio de la estabilidad de la función de transferencia anterior. Es decir, la posición de los polos para un punto de funcionamiento dado implicará que el sistema sea o no inestable y por ello que se desencadene el fenómeno del *chatter*.

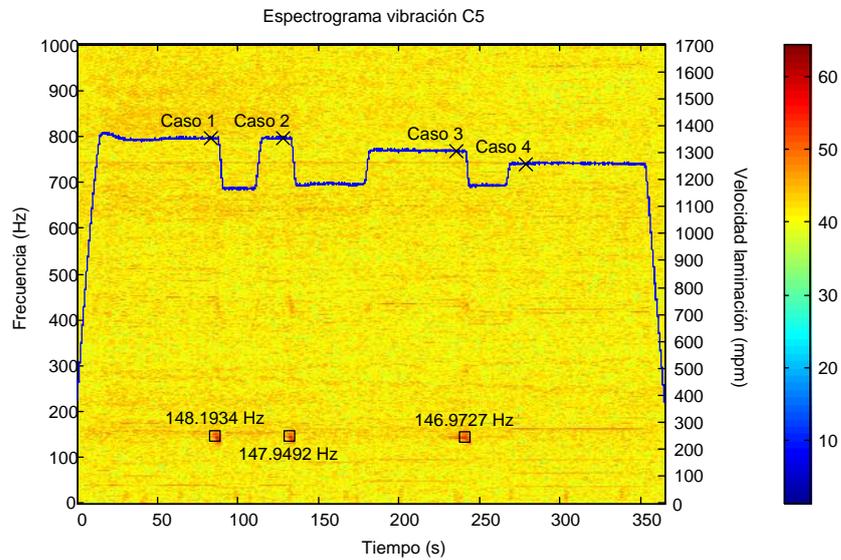
Para que éste resulte un modelo eficaz es importante que se asemeje a las condiciones reales de manifestación del *chatter*. Para ello se han tomado las características temporales y frecuenciales del modelo y se han comparado con las de varios episodios reales de *chatter* experimentados en la línea. En el

plano frecuencial, se observa en varios ejemplos del capítulo 5 como el rango de frecuencias de oscilación se sitúa en torno a 150 Hz. En la figura 6.4(a) es posible observar como la frecuencia natural del modelo se encuentra cerca de los 146 Hz, semejante por tanto a la del fenómeno real. Más difícil es comparar la respuesta temporal del sistema real y del modelo, al tratarse de un sistema inestable y desconocer el punto exacto de comienzo del fenómeno. En la figura 6.4(b) puede observarse la comparación de dos señales temporales: la señal filtrada del acelerómetro superior de la última caja tras una doble integración ($a = \frac{d^2x}{dt^2}$), para así obtener una lectura aproximada del movimiento de la caja en este punto; y la variación del espesor de salida Δh_s según el modelo, para un episodio de *chatter* (se supondrá que esta variación de espesor coincidirá con el movimiento vertical de los cilindros de trabajo). Este desplazamiento de los cilindros se multiplica por una constante empírica para trasladar el movimiento de los mismos al de la parte superior de la caja y así estimar un desplazamiento de la misma. De esta manera es posible comparar un desplazamiento real de la caja, vía la señal integrada de los acelerómetros, con un desplazamiento de la caja según el modelo. En la figura 6.4(b) puede observarse como la envolvente de la respuesta del espesor de salida se asemeja a la del sistema real de manera razonable.

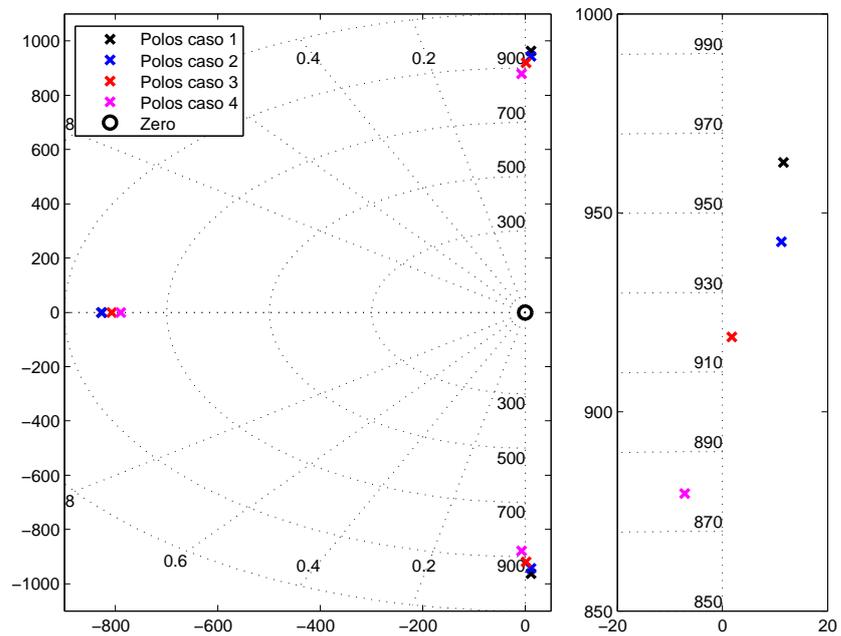
En la figura 6.5 se muestran los resultados de otro experimento orientado a demostrar la validez del modelo utilizado. Se parte de una bobina en la que se dieron tres episodios de *chatter* bien definidos. En la figura 6.5(a) se representa el espectrograma de la misma para la señal del acelerómetro de la caja 5 junto con la evolución de la velocidad de laminación. En la misma se marcan cuatro *casos*, correspondientes a unos instantes previos al *chatter* los tres primeros y unos instantes posteriores el último. Es fácil observar como ante la aparición de un episodio de *chatter* se reduce la velocidad de manera brusca. Es notable también como finalmente el nivel de velocidad del caso 4 es el que permite un procesamiento de la bobina libre del fenómeno. Cabe también fijarse en como la frecuencia de los tres episodios de *chatter* varía de manera descendente (148.19 Hz, 147.94 Hz y 146.97 Hz).

Los datos fundamentales del estado de laminación en los cuatro casos ilustrados fueron tomados a fin de calcular las funciones de transferencia en esos instantes¹. La situación de los polos y ceros (el cero será común a las cuatro funciones de transferencia) se ilustra en la figura 6.5(b), a la izquierda se representa una ampliación de la zona superior donde se ve claramente la

¹Algunos parámetros se ajustaron para que el *caso* 1 fuera semejante al real en el modelo: inestable y en torno a 150 Hz



(a) Espectrograma de una bobina con 3 episodios de *chatter* junto a su perfil de velocidad. Nótese la ubicación de los denominados *Casos* respecto a los episodios de *chatter*. Se marca además la frecuencia de oscilación exacta del *chatter*.



(b) Evolución de los polos del sistema para los casos anteriores. La ubicación de los polos del caso 4 introduce al sistema en el plano estable, al igual que en el caso real.

Figura 6.5: Comparación de un caso real con el modelo de *chatter*.

posición de estos polos. En concreto puede verse como en los tres primeros casos la situación de los polos define un sistema inestable mientras que el último caso entraría dentro de la estabilidad, asemejándose al comportamiento del caso real. Por último es posible observar también la frecuencia natural que marcan los polos del sistema, para el cálculo de la frecuencia de oscilación, un simple cálculo arroja unos resultados bastante parejos a los del caso real (153.22 Hz, 150.05 Hz y 146.22 Hz), también en orden descendente.

Una de las aportaciones de este trabajo al fenómeno del *chatter* es que permite explicar con claridad las diferencias encontradas hasta ahora, ver figura 5.2, en las frecuencias en las que el fenómeno se manifiesta. Es fácilmente observable cómo muchos autores sitúan el *chatter* en la banda de 150-250 Hz, sin embargo muy pocos tienen en cuenta la frecuencia exacta. En el completo trabajo de [113] ni siquiera se menciona este hecho, mientras que en [64] sí se anota la frecuencia exacta de vibración en varios casos, pero omite cualquier explicación a dicha peculiaridad. El planteamiento que este trabajo lleva a cabo permite calcular la frecuencia natural de oscilación así como observar su variación ante diferentes valores.

6.2.1. Influencia de los diferentes aspectos de laminación sobre la estabilidad del sistema

La descripción del fenómeno del *chatter* a través de una función de transferencia permite analizar dicho fenómeno a través de la posición de los polos asociados. Esta posibilidad abre la puerta al estudio del efecto sobre la estabilidad que las diferentes variables del modelo acarrearán. La finalidad última será enunciar criterios de diseño u operación que reduzcan el carácter inestable del ciclo y por tanto la aparición del fenómeno.

La mecánica de este estudio es fácil de comprender. Se trata de definir la función de transferencia del sistema (6.5) para diferentes valores de una serie de parámetros, de tal manera que posteriormente y a través de la posición de los polos sea posible observar la variación en el grado de estabilidad. De esta manera el estudio se limita a tomar cada uno de los parámetros fundamentales del sistema, darles valores y anotar la evolución de los polos. Sin embargo este proceso requiere establecer algún tipo de restricción, en general relacionada con la definición de estos nuevos puntos de funcionamiento para su posterior simulación. No es posible formular puntos de funcionamiento de manera directa, será necesario que cumplan alguno de los modelos de lami-

Param. Laminador	Param. Laminación
K_m	σ_e
B_m	σ_s
L	w
M	μ
V_s	S
K_t	
K_s	

Tabla 6.1: División de parámetros en estudio.

nación existentes, para ser, al menos, teóricamente reales.

Se puede afirmar que los parámetros más complejos de calcular son K_t y K_s . Una vez establecido un punto de funcionamiento será necesario el cálculo de las derivadas parciales sobre la expresión de fuerza utilizada (sección 6.1.2) para después sustituir esas expresiones y así obtener el valor de K_t y K_s en ese punto de funcionamiento. Para asegurar un cálculo de estos parámetros cercano a la realidad, el punto de funcionamiento deberá cumplir con la expresión teórica de fuerza utilizada, presentando así cierta coherencia con el proceso de laminación teórico.

En general, cada vez que se establecen nuevos valores para un parámetro será necesario hacerlo de tal manera que sea conforme con el modelo de fuerza utilizado. Bajo este planteamiento se pueden separar los parámetros fundamentales en dos grandes familias (ver tabla 6.1): aquellos cuya variación no implica la modificación del equilibrio de fuerzas y por tanto no requiere de un nuevo cálculo del modelo (denominados parámetros del laminador) y aquellos cuya variación sí requiere de operaciones sobre el modelo de fuerzas (6.1) a fin de mantener la coherencia de los datos (parámetros de laminación).

Mención aparte merece el coeficiente de rozamiento (μ). No parece posible calcular con exactitud dicho parámetro a pesar de que es imprescindible para la resolución del modelo de fuerzas. En este sentido y para de nuevo mantener la coherencia en el estudio, existe una etapa donde se estima este μ a partir de la resolución del modelo de fuerzas utilizado². Puede decirse que se utiliza este coeficiente de rozamiento como parámetro libre para el ajuste del modelo (como se menciona en [87]). Obviamente antes de aventurar ningún nuevo tipo de punto de funcionamiento el valor así obtenido es com-

²Se despeja el término μ del sistema de ecuaciones que forma el modelo.

parado con otras expresiones ampliamente utilizadas, como el coeficiente de rozamiento según Hill (6.6), para así asegurar una simulación con el máximo sentido físico.

$$\mu_{Hill} = \frac{\frac{F}{S\sqrt{R_m\Delta h}} - 1,08 + 1,02 \left(1 - \frac{h_s}{h_e}\right)}{1,79 \left(1 - \frac{h_s}{h_e}\right) \sqrt{\frac{R_m}{h_e}}} \quad (6.6)$$

Evolución de la estabilidad según parámetros del laminador

La operativa con este tipo de parámetros (ver tabla 6.1) es fácil de explicar, ver figura 6.6. Se toma un caso real con un episodio de *chatter* (en concreto el *caso 1* de la figura 6.5(a)) y se anotan sus características más importantes (F , σ_e , ...). Posteriormente se estima el coeficiente de rozamiento (μ) de tal manera que éste y el punto de funcionamiento dado sean conformes al modelo de laminación dado (ver sección 6.1.2). Con el punto de funcionamiento y el modelo de laminación elegido se calculan las derivadas parciales necesarias (K_t y K_s). Por último se selecciona el parámetro a simular y el rango de variación del mismo. Esta serie y los datos anteriores se sustituyen en la función de transferencia (6.5) donde se obtendrán así polos y ceros para cada valor de la serie. Todas estas nuevas funciones de transferencia se analizan para evaluar el grado de estabilidad ante el parámetro simulado.

Se describe primeramente la influencia de los parámetros K_m y B_m sobre la estabilidad. Ambos parámetros hacen referencia a las características elásticas y de amortiguación del tren respectivamente. El valor de K_m está relacionado con la estructura de la caja y los rodillos y modela la elongación de los mismos según la fuerza de apriete ejercida. En la figura 5.7 corresponderá a la pendiente de la recta M . Parece claro que tendrá un nivel constante en el tiempo salvo modificaciones importantes de la caja de laminación. En la figura 6.7 se observa la evolución de los polos según el valor de K_m (figura 6.7(a)) y de B_m (figura 6.7(b)) para el *caso 1* de la figura 6.5(a). En esta simulación se toman diferentes valores del parámetro K_m : un rango que a partir del valor establecido para K_m en el modelo, cubre desde 3.5 veces más hasta 1000 veces menos (en la selección de estos límites ha primado el sentido físico de los valores y la claridad de la gráfica asociada). El valor máximo se representa con un aspa roja, el valor mínimo con un aspa negra, el valor específico para el caso tomado como un rombo y el resto de polos calculados son puntos azules. Como se observa, un aumento de la rigidez (K_m) de la caja

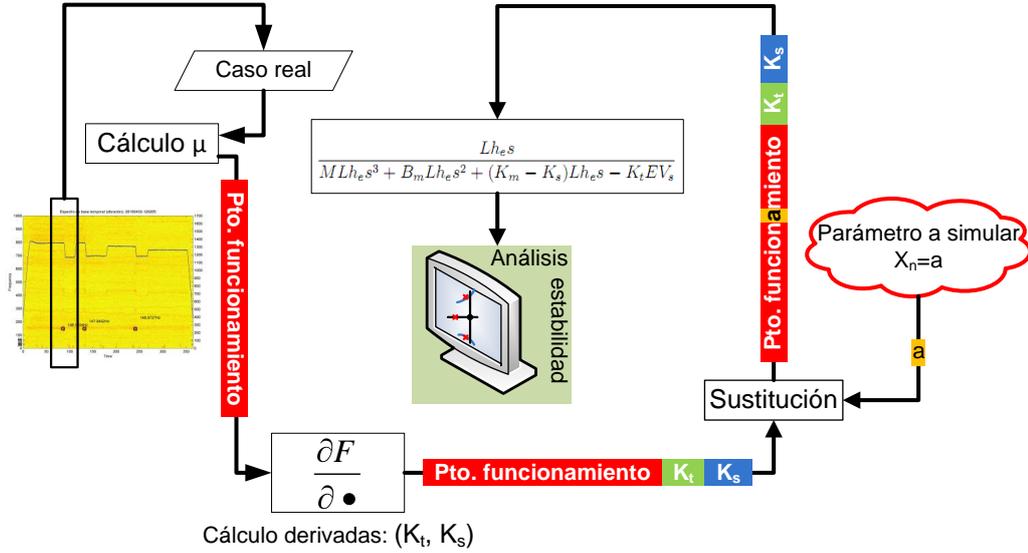
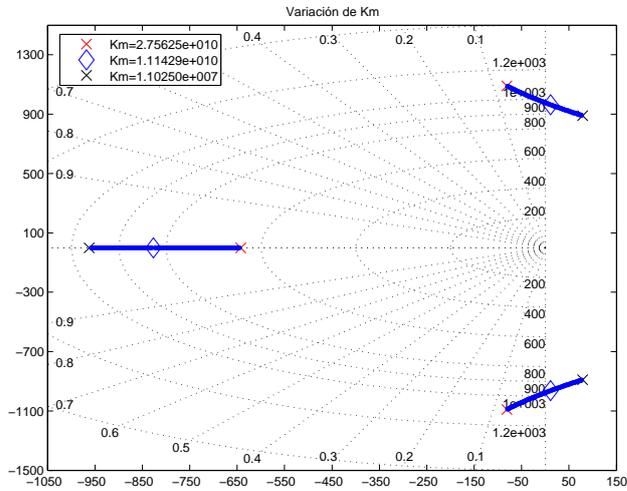


Figura 6.6: Mecanismo de cálculo para variables propias del laminador.

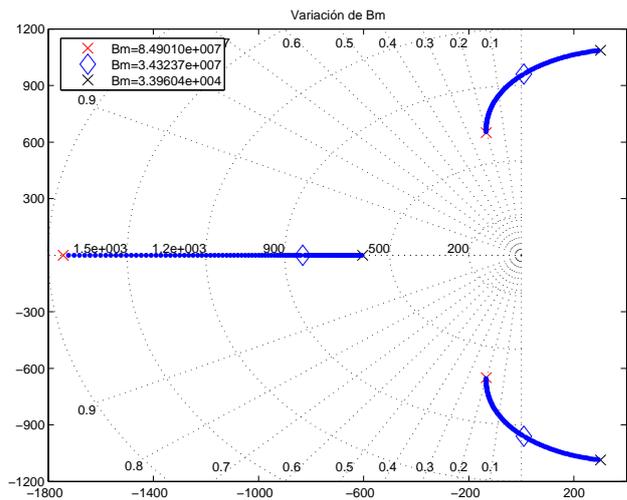
aporta estabilidad al sistema. Con un criterio similar se simula la aportación del parámetro B_m a la estabilidad del sistema (figura 6.7(b)), ampliando el rango de variación por arriba hasta 4.5 veces más que el valor del parámetro para el modelo en el caso en estudio. De esta manera es posible observar en la figura 6.7(b), como un aumento de la amortiguación (B_m) aumenta la estabilidad del mismo. El parámetro B_m es más difícil de cuantificar, siendo las condiciones de lubricación en las diferentes partes móviles, la temperatura de algunos elementos o el sistema hidráulico de apriete factores que marcan su valor. Sí parece más claro que este valor tiene una mayor variación en el tiempo (dentro de un rango), pudiendo incluso darse diferentes valores del mismo para una misma bobina, de acuerdo con los expertos en planta entrevistados.

Dos parámetros fácilmente entendibles son la distancia intercajas (L) y la masa conjunta de los rodillos (M). Como se observa en la figura 6.8(a) el aumento de la longitud intercaja aporta estabilidad al sistema (se ha simulado un rango de distancias entre 13 m y 2.2 m, siendo 4.5 m el real en planta). De manera inversa en la figura 6.8(b) puede comprobarse como la reducción de la masa de los rodillos (M) mejora la estabilidad del sistema.

Se muestra a continuación la evolución de los polos ante el cambio en los parámetros $K_t = \frac{\partial F}{\partial \sigma_e}$ y $K_s = \frac{\partial F}{\partial h_s}$. Como se deriva de la teoría clásica de laminación [87], los términos K_t y K_s son negativos, es decir, ante incrementos de fuerza de laminación la tensión de entrada y el espesor de salida disminuyen.



(a) Evolución de los polos ante variaciones del parámetro K_m .

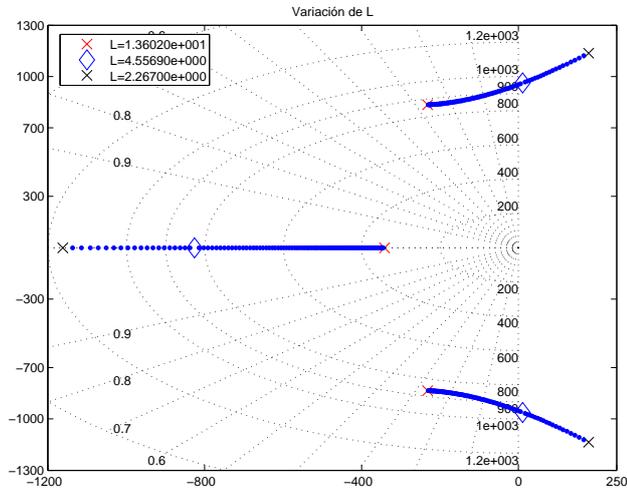


(b) Evolución de los polos ante variaciones del parámetro B_m .

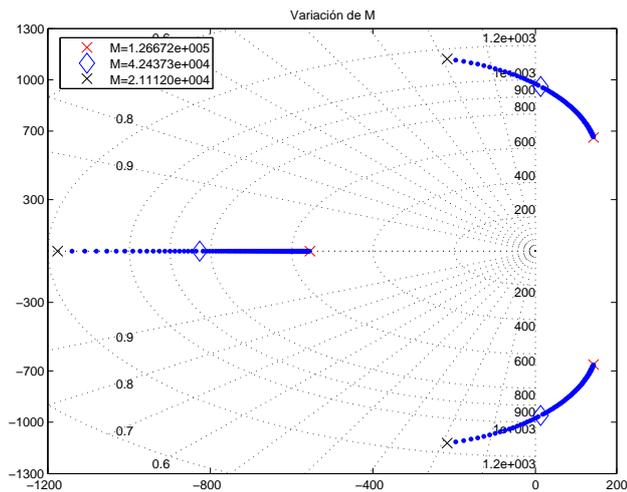
Figura 6.7: Estudio de la estabilidad y los parámetros del laminador (I).

Bajo esta premisa se observa en la figura 6.9(a) que una disminución de $|K_t|$ aporta estabilidad al sistema (obvio ya que como se observa en el modelo la interacción fuerza y tensión es la clave del fenómeno). El comportamiento del término K_s es inverso, un aumento en el módulo de éste (recuérdese es negativa) aporta mayor estabilidad al sistema.

Un factor fundamental en este estudio es la influencia de la velocidad de



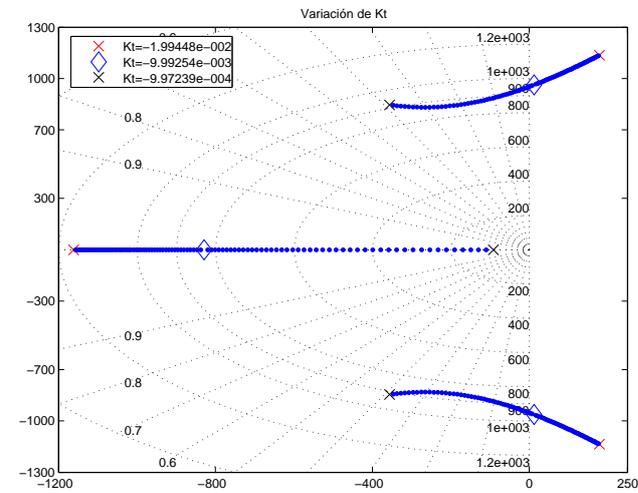
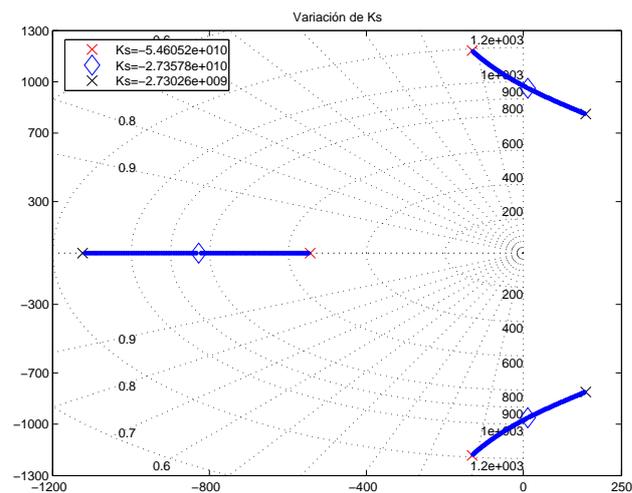
(a) Evolución de los polos ante variaciones del parámetro L .



(b) Evolución de los polos ante variaciones del parámetro M .

Figura 6.8: Estudio de la estabilidad y los parámetros del laminador (II).

laminación (V_s) a la estabilidad. Dado que este es el parámetro utilizado en la actualidad para la eliminación del *chatter*, una justificación cuantitativa del efecto de su variación sobre la estabilidad del sistema permitirá diseñar mejores sistemas de actuación. En la figura 6.10 puede verse con claridad, como la reducción de la velocidad de laminación introduce los polos en el semiplano negativo, añadiendo estabilidad al sistema.

(a) Evolución de los polos ante variaciones del parámetro K_t .(b) Evolución de los polos ante variaciones del parámetro K_s .**Figura 6.9:** Estudio de la estabilidad y los parámetros del laminador (III).

Un criterio para el cálculo de la velocidad crítica de laminación

El cálculo de una velocidad crítica a partir de la cual el sistema se vuelve inestable debe ser prioritario para una operación al límite de las capacidades del proceso. En este sentido y a través del criterio de Routh-Hurwitz se ha definido un criterio para el cálculo de la velocidad límite de laminación (6.7):

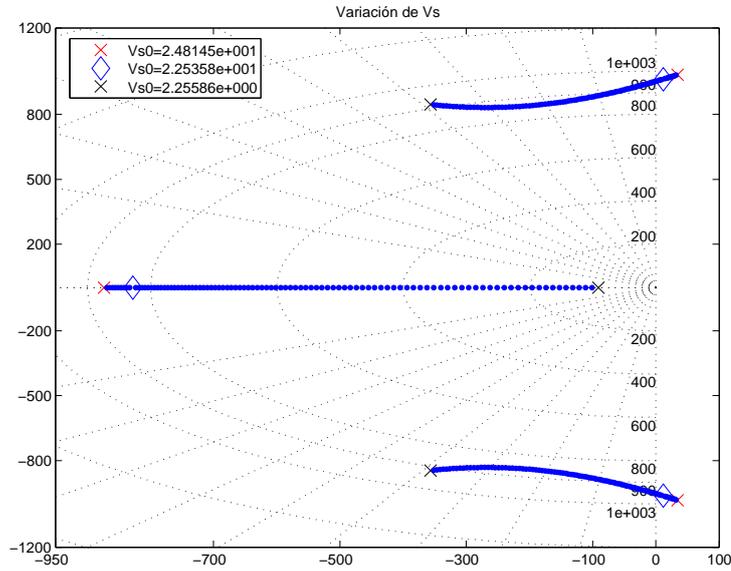


Figura 6.10: Evolución de los polos ante variaciones del parámetro V_s .

Caso	V_s (mpm)	$V_{s_{crit}}$ (mpm)
1	1353	1289
2	1353	1290
3	1305	1296
4	1260	1303

Tabla 6.2: Comparación entre velocidad de laminación y la crítica según criterio

$$V_{s_{crit}} = \frac{B_m L h_e (K_m - K_s)}{-K_t E M} \quad (6.7)$$

donde cabe recordar que K_s y K_t son menores que 0. Gracias a este criterio es posible calcular los valores límite para cada uno de los cuatro casos tenidos en cuenta, ver figura 6.5(a). Los resultados aparecen en la tabla 6.2, donde se ve claramente como en el caso 4 la velocidad real de laminación está por debajo de la crítica calculada, correspondiendo con el caso estable real.

Se llevó a cabo una comprobación de este criterio sobre un grupo de bobinas (20) que presentaban algún episodio de *chatter* (en la caja 5) de fácil detección y aislamiento. Dicho grupo engloba bobinas de diferentes formatos, dureza y reducciones para un mayor valor del estudio. Además fueron

extraídas en periodos diferentes de laminación (repartidas en 4 meses) de tal manera que las condiciones del tren hubieran cambiado (rodillos de trabajo y apoyo, etapas de mantenimiento, ...). Para cada una de estas bobinas se identificaron los instantes de máxima vibración para tomar los momentos previos (denominados *chatter*) y aquellos en los que la velocidad se redujo para volver después a un funcionamiento normal (denominados *no chatter*). De esta manera para cada bobina en cuestión se obtienen al menos dos puntos, uno para la situación previa al *chatter* y otro para un estado donde ya no vuelve aparecer.

En la figura 6.11 es posible observar los resultados de este experimento: el eje X representa la diferencia entre la velocidad de laminación real y la teórica crítica según el criterio ($\Delta V = V_s - V_{s_{crit}}$) (muestras a la derecha representan instantes donde la velocidad de laminación es mayor que la crítica mientras que en la izquierda se sitúan muestras con una velocidad menor). De la misma manera se identifica con colores las muestras provenientes de casos con *chatter* y aquellos de estados *no chatter*. Como se observa en dicha figura aquellas muestras con *chatter* sobrepasan la frontera crítica mientras que las de estados sin *chatter* no la traspasan en su mayoría. Destacar en este punto la excepcionalidad de este estudio por su carácter altamente real, donde se aplica en masa (a datos provenientes de planta) el criterio antes definido.

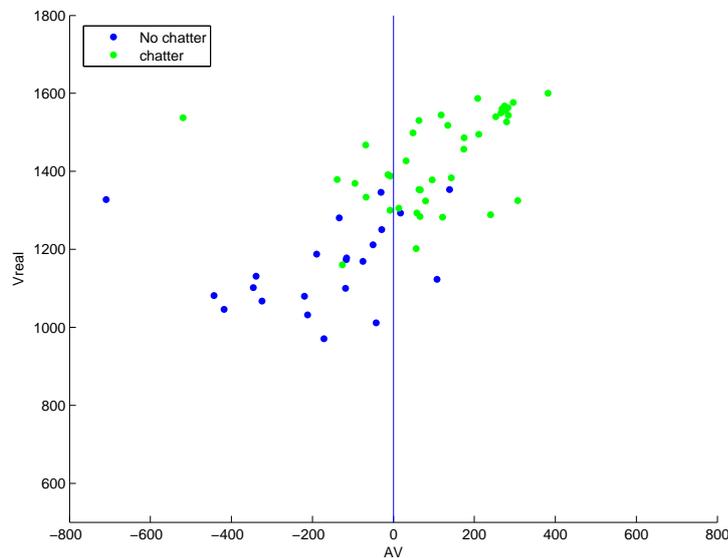


Figura 6.11: Resultado de la aplicación del criterio de velocidad crítica sobre 22 bobinas.

La confección de criterios para definir la velocidad crítica de laminación

ha sido un objetivo constante en el estudio del fenómeno *chatter*. En la sección 3.2.5 se resumen algunos de los intentos más importantes en este aspecto, pudiéndose comparar los mismos con el definido en este capítulo.

Se ha mostrado entonces la evolución de la estabilidad con los cambios en las derivadas de fuerza. Sin embargo la cuestión más importante radica en cómo poder alterar estos valores. Estas derivadas son producto del propio proceso de laminación, es decir, de la interacción banda-fuerza-tensión que produce la reducción propiamente. En este sentido y con ayuda de los modelos de laminación anteriores, es posible el cálculo analítico de estas derivadas y por tanto el cálculo de su variación ante la evolución de los parámetros propios de laminación (ver (6.1)).

Evolución de la estabilidad según parámetros de laminación

Se distingue en este capítulo a los parámetros propios de los modelos de laminación, ver tabla 6.1. Como se observa en (6.1) son varios los parámetros que intervienen en el proceso de laminación, siendo las tensiones, el ancho de la banda, las características de rozamiento y la dureza del material los estudiados en esta sección. Sin embargo se ha omitido el estudio del parámetro “reducción” dado que éste vendrá dado por las necesidades demandadas por el cliente³. El valor de estos parámetros influyen directamente en el equilibrio de fuerzas del modelo de laminación y por tanto, al derivar dicha expresión, en los términos K_t y K_s .

El mecanismo de simulación de este grupo de variables difiere ligeramente del anterior. Cómo se comenta en la sección 6.2.1 es necesario mantener la coherencia con el modelo de fuerzas utilizado a la hora de establecer el nuevo valor de los parámetros de laminación. Con el fin de seguir reflejando un proceso real (o al menos acorde al modelo teórico), cuando se modifica una de las variables de este grupo es necesario recalcular el valor de algún otro parámetro a fin de generar un nuevo punto de funcionamiento válido para el modelo. En este caso se utiliza como parámetro libre el nivel de fuerza de laminación mientras que se mantiene iguales al caso inicial el resto.

El mecanismo es el siguiente, dado un caso real se estima el valor del coe-

³Obviamente la filosofía de este estudio trata de reducir la incidencia del *chatter* en la producción diaria, no de modificar las características del producto final (reducción) para reducir el *chatter*.

ficiente de rozamiento (μ) correspondiente⁴. A continuación se selecciona el parámetro a simular y se le da un valor. Obviamente será necesario definir un nuevo punto de funcionamiento que contenga el nuevo valor del parámetro pero que sea conforme al modelo de laminación. Para ello se vuelve a estimar la fuerza que le correspondería al nivel de rozamiento estimado y a ese nuevo valor del parámetro. Se modifica entonces el punto de funcionamiento inicial para generar uno nuevo donde se conserva el valor inicial de todos los parámetros salvo el del parámetro en análisis, el rozamiento estimado inicialmente y un nuevo valor de fuerza conforme al modelo. Finalmente a través del cálculo de las derivadas del modelo se obtienen los parámetros K_s y K_t . Junto a los parámetros del laminador se podrá ya completar la función de transferencia (6.5) y calcular así la ubicación de los polos del sistema. En la figura 6.12 se esquematiza el proceso de cálculo de los polos para un valor nuevo de una variable de laminación.

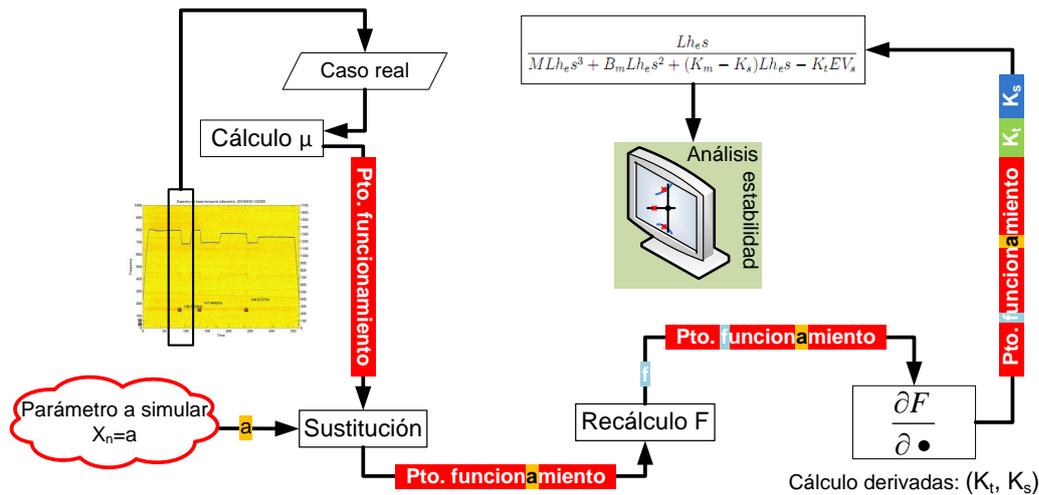


Figura 6.12: Mecanismo de cálculo para variables propias del proceso de laminación.

Se muestra en 6.13 la evolución de la estabilidad según los valores de tensión de entrada (dcha.) y salida (izda.). Es fácil observar como un incremento de la tensión (tanto entrada como salida) aporta estabilidad al sistema introduciendo los polos en el plano estable. Dado que este estudio se circunscribe a la caja 5, es necesario recordar que la tensión de salida en ésta se mantiene constante a un valor fijo por requerimientos de la bobinadora, estando ésta fuera de los esquemas de control del tren. De cualquier manera y en aras de contemplar el mayor número de aspectos posibles se muestra en la figura 6.13

⁴Según el modelo de laminación seleccionado

la aportación de la misma a la estabilidad. El valor de esta tensión de salida es en general pequeño en comparación con el resto de valores de tensión, de ahí que no haya sido posible simular un rango amplio de valores (y que además poseyeran algún sentido físico).

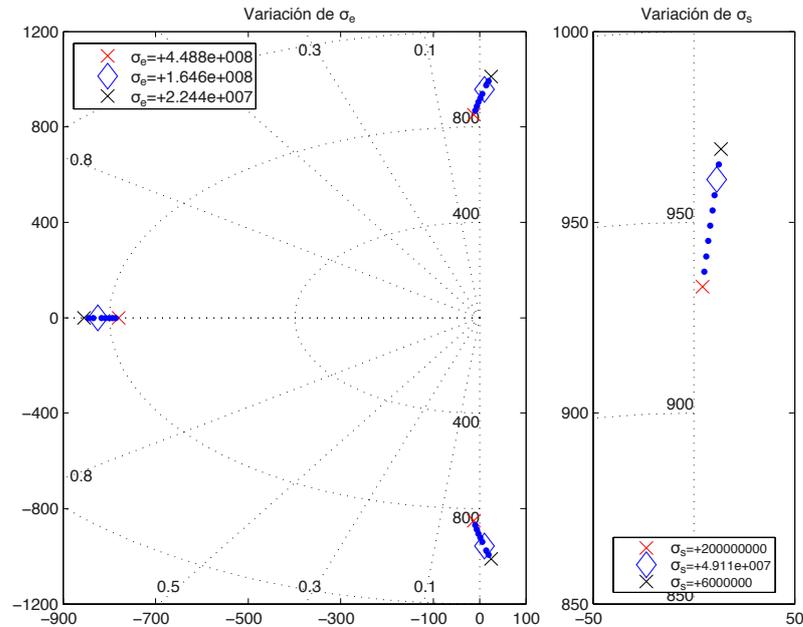


Figura 6.13: Influencia de las tensiones (entrada/salida) sobre la estabilidad del sistema.

El ancho de la banda también parece relacionado con el fenómeno *chatter*. En la figura 6.14 se observa como una reducción del mismo permite un aumento de la estabilidad (el rango de variación se toma dentro de unos valores con cierto sentido físico). Esta afirmación coincide con la encontrada en [64] donde una banda más ancha lleva a una reducción de la velocidad crítica de laminación.

En la figura 6.15 (izda.) se observa la evolución de la estabilidad con respecto al valor del coeficiente de rozamiento, nótese como una reducción del mismo aporta estabilidad al sistema, es decir una mayor lubricación reducirá el riesgo de *chatter*. Es ampliamente reconocida la existencia de algún tipo de relación entre las condiciones de rozamiento y las vibraciones, especialmente *chatter*. Sin embargo aún hoy esta influencia no ha sido completamente comprendida e incluso algunas de las conclusiones alcanzadas en la literatura son contradictorias. Por ejemplo, [88] mediante la medición de la temperatura de la banda (influenciada por las condiciones de rozamiento) concluye que el *chatter* es causado por el deslizamiento de la banda respecto

al rodillo debido a un exceso de lubricación. Otras fuentes [10] encontraron, de forma experimental, *chatter* en las últimas cajas (4 y 5) y en situaciones de fuerzas bajas de laminación y rodillos con un exceso de pulido o lubricación. En contraste, estudios [106] en un tren de tres cajas apuntan a que el *chatter* se manifiesta en laminaciones con reducciones próximas al límite teórico con condiciones de lubricación deficiente. Incluso se señala en [34] que una pobre lubricación aumenta el *gage* (espesor de salida) y reduce el ángulo de mordida, conduciendo a un mecanismo cíclico de variación de la fuerza de apriete que desembocará en un régimen vibratorio autoexcitado. También en [10] se menciona un ejemplo en el que una súbita reducción de la lubricación ocasiona un episodio de inestabilidad vibratorio dentro de una operación experimental. Por último en [54], a través de la definición de un índice de estabilidad, plantea la existencia de un rango de coeficiente de rozamiento óptimo respecto al *chatter* (nótese que lleva a cabo un planteamiento multicaja). Parece haber por tanto experiencias documentadas donde, ya sea por un nivel demasiado alto o demasiado bajo del coeficiente de fricción, el *chatter* aparece.

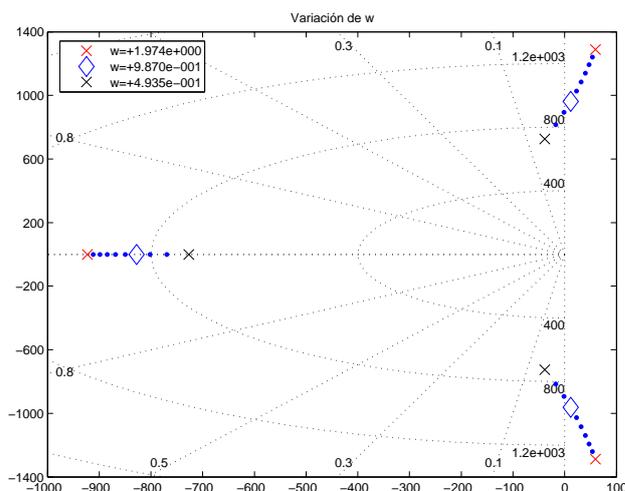


Figura 6.14: Influencia del ancho de la banda sobre la estabilidad del sistema.

Como se explica en las líneas precedentes, la simulación de este trabajo advierte de cómo una reducción del coeficiente de rozamiento aporta estabilidad. Sin embargo a fin de arrojar algo más de luz a las observaciones anteriores se decidió ampliar un poco más este experimento. Es posible observar como en la figura 6.15 (izda.) el valor máximo de rozamiento parece tender a su vez a la estabilidad. A tal fin se fuerza el valor de rozamiento superior simulado al límite de la convergencia del algoritmo del cálculo del rozamiento (μ). En la figura 6.15 (dcha.) se observa el resultado de esta am-

pliación del rango de la simulación. En ella el valor máximo de rozamiento parece que vuelve a introducirse en la zona estable. Este es sin duda un resultado curioso que lleva a pensar en una franja de valores de rozamiento en los cuales el sistema se hace inestable. De cualquier manera habría que plantear el debate sobre el sentido físico de estos valores y en general del significado del coeficiente de rozamiento en laminación, así como de las alternativas en su definición (Tresca, Wanheim y Bay).

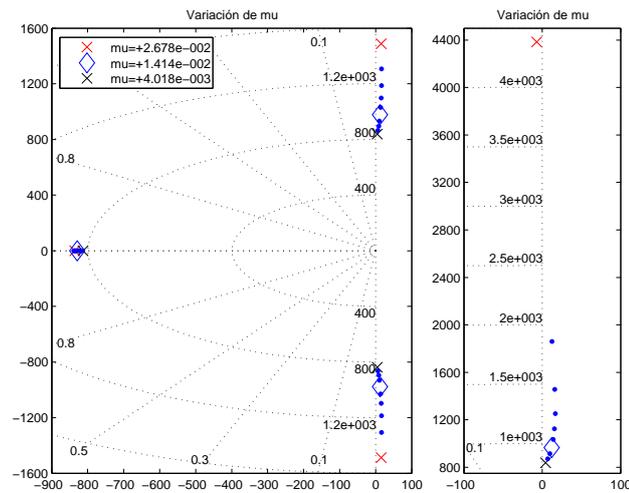


Figura 6.15: Influencia del coeficiente de rozamiento μ sobre la estabilidad del sistema (izda.). Resultado de un valor extremo superior del valor de μ (dcha.).

Por último se analiza un parámetro totalmente dependiente del material, la evolución del límite elástico a lo largo de toda la curva de endurecimiento por deformación en frío. En general es bien conocido que el acero y, en general, la mayoría de los materiales metálicos sufren un fenómeno de endurecimiento en los procesos de transformación en frío, es decir, el límite de fluencia aumenta y la ductilidad disminuye. Para un proceso de laminación en frío viable es necesario conocer con exactitud las curvas de endurecimiento, es decir, la relación entre la deformación acumulada y el aumento de la resistencia del mismo. Este parámetro es introducido en la simulación y sus resultados se observan en 6.16. Cada punto representa un incremento proporcional de los valores que definen la curva: así para el caso base el incremento fue nulo (diamante), en el caso más elevado (aspa roja) el incremento es de un 35 % mientras que en el más reducido (aspa negra) se redujo un 20 %. La figura muestra como con una reducción del fenómeno del endurecimiento (material menos duro y más dúctil) el fenómeno del *chatter* desaparece. Dicha afirmación parece ir en sintonía con [106] y con el conocimiento experto de los operarios en planta que relacionan el fenómeno del *chatter* con la la-

minación en condiciones de fuerza y reducción cada vez más extremas.

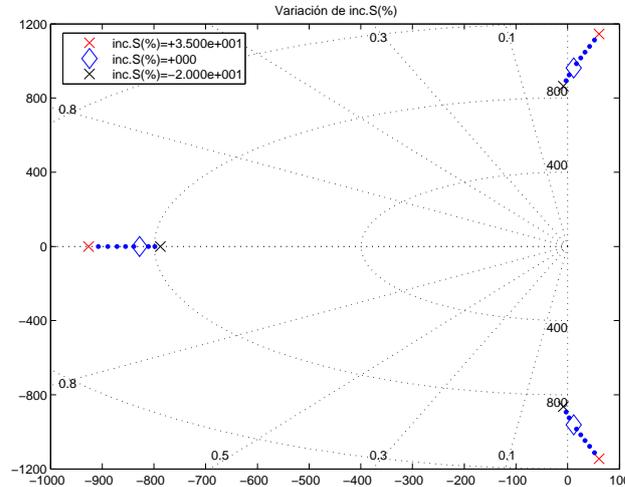


Figura 6.16: Influencia de la dureza del material sobre la estabilidad del sistema.

Finalmente es muy interesante comprobar el efecto de la fuerza de laminación sobre la aparición del fenómeno del *chatter*. Como se deduce del método de simulación empleado, este efecto no puede ser calculado de forma directa como hasta ahora. Es muy difícil variar la fuerza y a la vez obtener casos válidos y cercanos a la realidad en el resto de parámetros. Es por ello que se tomo un enfoque basado en datos para ver la influencia de la fuerza sobre la estabilidad. Sobre el mismo conjunto de bobinas reales con episodios de *chatter* utilizados en el experimento de la figura 6.11, se calculó el valor de K_t y K_s . En la figura 6.17 puede verse la representación de la fuerza ante esas variables, claramente se observa como un incremento de fuerza hace mayor el módulo de $K_t = \frac{\partial F}{\partial \sigma_e}$ y $K_s = \frac{\partial F}{\partial h_s}$ (ambas negativas). A través de la figura 6.9(a) se comprueba como un aumento del módulo de K_t resta estabilidad al sistema, mientras que a través de la figura 6.9(b) se comprueba como el aumento del módulo de K_s la aporta. Para una mejor definición del efecto de la fuerza habría que observar en cada caso que variable (K_t o K_s) tiene una mayor influencia en la posición de los polos.

El efecto de la fuerza sobre el fenómeno del *chatter* es ciertamente controvertido. En [10] se encuentra *chatter* en laminaciones con bajo nivel de fuerza y condiciones de lubricación extremas. Muy al contrario en [106] y según testimonio de expertos en la planta en estudio, se señalan a las laminaciones extremas (altos niveles de fuerza y reducción) como las más proclives a presentar episodios de *chatter*. Quizás en el primer caso la dinámica del sistema esté más influenciada por el valor de K_s y unos valores bajos de fuerza resten

estabilidad al sistema, mientras que para el caso de laminaciones extremas prime más el término K_t y un exceso de fuerza disminuya la estabilidad. De cualquier manera parece clara la necesidad de estudios posteriores que cuantifiquen la aportación a la estabilidad del sistema de cada uno de los factores nombrados en este capítulo.

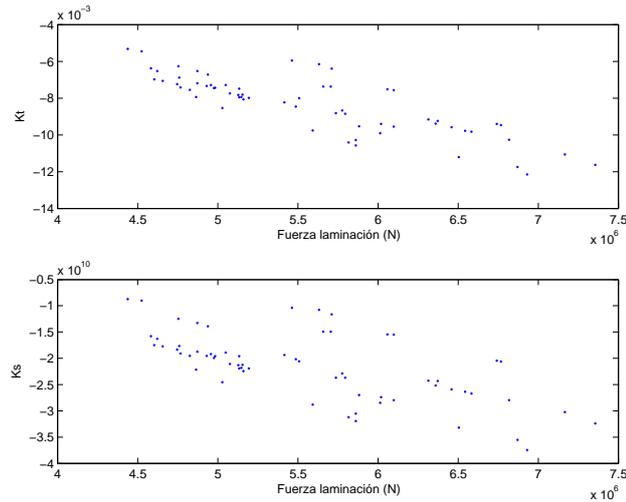


Figura 6.17: Influencia de la fuerza sobre los parámetros K_t y K_s .

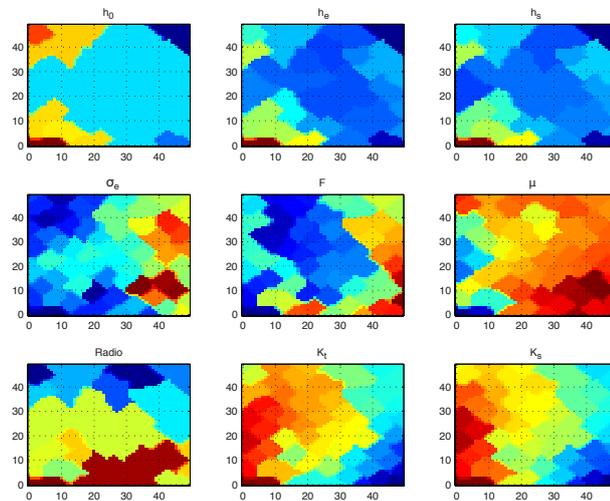


Figura 6.18: Relación entre la fuerza de laminación y el resto de variables, entre ellas los parámetros K_t y K_s .

Se incluye también los planos de componentes relativos a un modelo SOM generado con los datos del grupo de bobinas anterior, figura 6.18. Es posible observar en dicha figura como la relación de F con K_t y K_s es inversa (regiones

muy similares y colores invertidos) y que en conjunto con el mapa de tensión de entrada (σ_e) explica la variación de las variables anteriores (recordar que la fuerza y la tensión son las dos maneras de aportar energía para conseguir la deformación del material). Desgraciadamente y debido al carácter real de los datos, no es posible obtener muestras que incluyan grandes diferencias en la reducción alcanzada (variedad en los espesores de entrada y salida) ya que siempre se lamina en torno a los mismos valores.

Esquema general de estabilidad ante el *chatter*

A fin de definir una herramienta de fácil manejo y entendimiento, los resultados comentados en los apartados anteriores se condensan ahora de manera tabulada en 6.3. Un aumento en el valor de las variables en verde o una reducción de las variables en rojo aumenta la estabilidad.

Mejora Estabilidad	
Laminador	Laminación
K_m	σ_e
B_m	σ_s
L	w
M	μ
V_s	S
$-K_t$	Aumento
$-K_s$	Reducción

Tabla 6.3: Tabla resumen con la evolución de la estabilidad según parámetros fundamentales de la laminación.

Es en [64] (sin duda una de las aportaciones más interesantes) donde se muestra un resultado similar, indicando el porcentaje de variación a llevar a cabo en una serie de parámetros para obtener un aumento de un 10% en la velocidad crítica de laminación. En dicho trabajo los modelos son diferentes al aquí utilizado así como el tratamiento del fenómeno del *chatter* mismo, apareciendo algún otro parámetro del laminador que aquí no se contempla, sin embargo esta tesis añade más variables del proceso de laminación (μ por ejemplo). Cabe destacar que dicho autor difiere en el resultado obtenido respecto a la tensión de entrada (σ_e), donde según él será necesario reducir la misma para aumentar la velocidad crítica.

Capítulo 7

Caracterización dinámica del fenómeno del *chatter*

7.1. Introducción

La última etapa de este estudio trata de acercarse lo más posible a las condiciones reales de formación del *chatter*. Para ello, y sobre la base del modelo teórico anterior, se llevaron a cabo ciertas modificaciones que permitieron utilizar los datos reales disponibles en las diferentes variables del modelo. Una vez que ha sido posible la integración de éstos, se pasa a una fase de identificación de parámetros que permite observar la evolución en el tiempo de los parámetros y características dinámicas del ciclo. La intención última, una vez estudiado convenientemente el fenómeno, será aprovechar todo este conocimiento para la confección de un modelo dinámico basado en datos, bajo una filosofía visual, que permita la identificación correcta del fenómeno.

7.2. El modelo con datos reales

Se dispone de la evolución temporal de una serie de variables fundamentales del proceso de laminación. A través de estas variables y mediante la definición de un modelo, se lleva a cabo un estudio sobre la evolución temporal de los parámetros estimados en el modelo a fin de entender mejor el mecanismo del formación del *chatter*. En la figura 7.1(a) se representa el diagrama estructural del modelo para la caracterización del *chatter*. En él se señalan cuatro entidades diferentes: la referente al proceso de reducción del material; el mecanismo de la caja de laminación; el submodelo que rige la

continuidad de flujo de material y aquel que simula la variación de las tensiones entre cajas. Estos bloques se relacionan entre sí a través de una serie de variables, figura 7.1(a): velocidades de entrada y salida (V_e y V_s); espesores de entrada y salida (h_e y h_s); tensiones de entrada y salida (σ_e y σ_s); la fuerza (F) que la banda ejerce sobre el cilindro de trabajo y la fuerza (F_H) que el sistema hidráulico ejerce sobre el paquete de cilindros (en realidad sobre el cilindro de apoyo). En este diagrama se han identificado las nuevas variables a sustituir por el conjunto de datos reales: σ_e , V_e y V_s . En la figura 7.1(b) se describe la estructura del nuevo modelo para la caracterización del *chatter* basado en el diagrama anterior pero teniendo en cuenta que V_e se convierte en entrada y sirve además para estimar h_e que deja de ser una entrada. Los términos h_{e0} , V_{e0} y V_{s0} serán los valores de equilibrio del punto de linealización utilizado para aplicar la ecuación de continuidad y resultado de la media de esas variables durante el periodo de tiempo estudiado; el término V_c representa la velocidad de salida en la caja anterior, es decir, la de cabeza de la banda que entra en la caja estudiada.

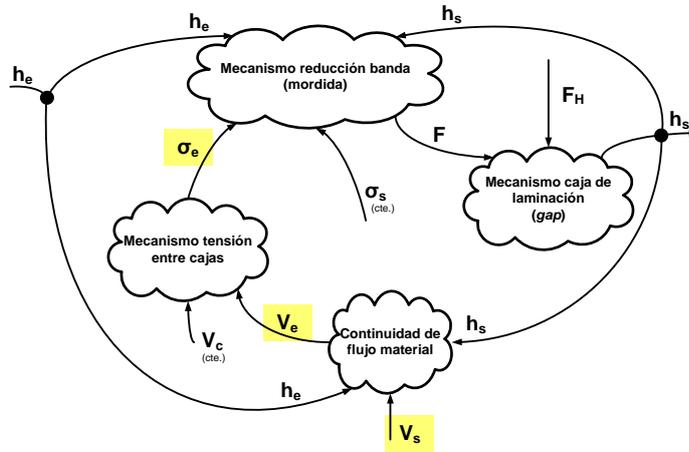
La estructura de la figura 7.1(b) permite describir cuatro funciones de transferencia (7.1) con un denominador común. Nótese como ahora se dispone de sistemas de segundo orden, a diferencia de en (6.5) donde el sistema posee tres polos. Este tercer polo venía incluido en el bloque que relaciona la tensión con los cambios de velocidad. En la nueva estructura se dispone del valor de la tensión a partir de los datos reales, así que será de esperar que el comportamiento aportado por ese polo se vea reflejado en la evolución de dicha variable.

$$\frac{\Delta h_s}{\Delta F_H} = \frac{-1}{Ms^2 + B_ms + K_m - \left. \frac{\partial F}{\partial h_s} \right|_0 - \frac{V_{s0}}{V_{e0}} \left. \frac{\partial F}{\partial h_e} \right|_0} \quad (7.1a)$$

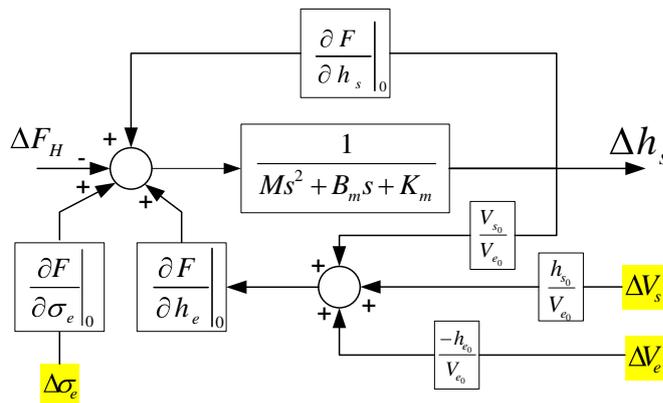
$$\frac{\Delta h_s}{\Delta \sigma_e} = \frac{\left. \frac{\partial F}{\partial \sigma_e} \right|_0}{Ms^2 + B_ms + K_m - \left. \frac{\partial F}{\partial h_s} \right|_0 - \frac{V_{s0}}{V_{e0}} \left. \frac{\partial F}{\partial h_e} \right|_0} \quad (7.1b)$$

$$\frac{\Delta h_s}{\Delta V_e} = \frac{-\frac{h_{e0}}{V_{e0}} \left. \frac{\partial F}{\partial h_e} \right|_0}{Ms^2 + B_ms + K_m - \left. \frac{\partial F}{\partial h_s} \right|_0 - \frac{V_{s0}}{V_{e0}} \left. \frac{\partial F}{\partial h_e} \right|_0} \quad (7.1c)$$

$$\frac{\Delta h_s}{\Delta V_s} = \frac{\frac{h_{s0}}{V_{e0}} \left. \frac{\partial F}{\partial h_e} \right|_0}{Ms^2 + B_ms + K_m - \left. \frac{\partial F}{\partial h_s} \right|_0 - \frac{V_{s0}}{V_{e0}} \left. \frac{\partial F}{\partial h_e} \right|_0} \quad (7.1d)$$



(a) Diagrama estructural del modelo para la caracterización del *chatter*.



(b) Linealización del modelo bajo nuevas condiciones

Figura 7.1: Estructura del modelo con datos reales.

7.3. El proceso de identificación de parámetros

7.3.1. La identificación de parámetros

En este trabajo la identificación trata de estimar los parámetros que conforman la función de transferencia (7.2) de un sistema supuesto lineal de carácter discreto, a partir de unas secuencias de datos u_k e y_k que serán la entrada y salida del sistema respectivamente. Dentro de la variedad de modelos de identificación lineales, se ha utilizado el denominado ARMAX (*autoregressive moving average model with exogenous inputs*) al suponer que

la salida tiene añadido ruido coloreado (no blanco) que para este modelo se supone generado por ruido blanco (ν_k) que ha pasado a través de un filtro lineal [62], ver figura 7.2.

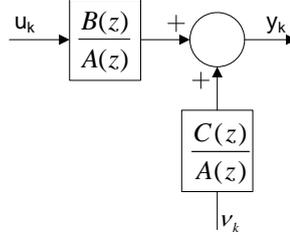


Figura 7.2: Esquema del modelo ARMAX utilizado para la identificación.

$$\frac{y(z)}{u(z)} = G(z) = \frac{b_1 z^{-1} + \dots + b_n z^{-n}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}} = \frac{B(z)}{A(z)} \quad (7.2)$$

El sistema tendrá una ecuación en diferencias de la siguiente forma (7.3):

$$y_k = -a_1 y_{k-1} - \dots - a_n y_{k-n} + b_1 u_{k-1} + \dots + b_n u_{k-n} + \nu_k + c_1 \nu_{k-1} + \dots + c_n \nu_{k-n} \quad (7.3)$$

donde ν_k sería una variable aleatoria con distribución normal (ruido blanco) y c_i los parámetros del modelo para el ruido coloreado. El modelo ARMAX tendrá como elemento a identificar el vector (7.4):

$$\boldsymbol{\theta}_k^T = (a_1, a_2, \dots, a_n, b_1, b_2, \dots, b_n, c_1, c_2, \dots, c_n) \quad (7.4)$$

y como vector de historia de entradas y salidas (7.5):

$$\boldsymbol{\varphi}_{k-1}^T = (-y_{k-1}, \dots, -y_{k-n}, u_{k-1}, \dots, u_{k-n}, \nu_{k-1}, \dots, \nu_{k-m}) \quad (7.5)$$

El proceso de estimación denominado RLS (*recursive least square*) es un proceso iterativo donde en cada instante de muestreo hay que calcular los siguientes términos:

1. Calcular la matriz de ganancia \mathbf{L}_k :

$$\mathbf{L}_k = \frac{\mathbf{P}_{k-1} \boldsymbol{\varphi}_{k-1}}{\boldsymbol{\varphi}_{k-1}^T \mathbf{P}_{k-1} \boldsymbol{\varphi}_{k-1} + \lambda} \quad (7.6)$$

2. Calcular el error residual a priori (ϵ_k):

$$\epsilon_k = y_k - \boldsymbol{\varphi}_{k-1}^T \boldsymbol{\theta}_{k-1} \quad (7.7)$$

3. Actualizar la estimación de parámetros ($\boldsymbol{\theta}_k$):

$$\boldsymbol{\theta}_k = \boldsymbol{\theta}_{k-1} + \epsilon_k \mathbf{L}_k \quad (7.8)$$

4. Actualizar la matriz de covarianzas (\mathbf{P}_k):

$$\mathbf{P}_k = \frac{1}{\lambda} (\mathbf{I} - \mathbf{L}_k \boldsymbol{\varphi}_{k-1}^T) \mathbf{P}_{k-1} \quad (7.9)$$

Como cabe suponer, no se posee directamente el valor del ruido, pero se puede lograr una estimación. La propia ecuación de cálculo del error residual (7.7) a priori en el RLS nos puede proporcionar esta estimación puesto que precisamente ϵ_k es una estimación de ν_k . Sin embargo se puede obtener una estimación bastante mejor si se realiza el cálculo con los parámetros ya actualizados $\boldsymbol{\theta}_k$ (7.10) entre los pasos tres y cuatro anteriores:

$$\nu_k = y_k - \boldsymbol{\varphi}_{k-1}^T \boldsymbol{\theta}_k \quad (7.10)$$

Uno de los parámetros clave en el algoritmo RLS es el llamado factor de olvido (λ). Este parámetro hace referencia al número de muestras anteriores a tener en cuenta para la estimación del instante actual. De esta manera es posible llevar a cabo una estimación donde todas las muestras son tenidas en cuenta o solo un número de muestras reciente, caso éste útil para un sistema variante como el de este problema. Por último cabe recordar que se está estimando una función de transferencia lineal variante como aproximación a un sistema no lineal con un punto de linealización cambiante.

7.3.2. Resultados obtenidos

El objetivo de la etapa de identificación será estimar los términos de las cuatro ecuaciones en (7.1) pero bajo la forma discreta de (7.2). El proceso de estimación de este trabajo se ha aplicado a un modelo con una estructura de varias entradas y una salida, resultando en una extensión de los vectores utilizados. En concreto se toman como valores de entrada (\mathbf{u}): la fuerza de laminación (F_H); tensión de entrada (σ_e) y velocidades de entrada (V_e) y de salida (V_s); y como valores de la salida (y): el espesor a la salida de la caja

(h_s) (cabe recordar que todo este estudio se lleva a cabo en la caja cinco, última del tren):

$$\mathbf{u} = (F_H, \sigma_e, V_e, V_s) \quad (7.11a)$$

$$y = (h_s) \quad (7.11b)$$

Consecuentemente el vector a identificar y el de históricos quedarán:

$$\boldsymbol{\theta}_k^T = (a_1, a_2, b_1^1, b_2^1, b_1^2, b_2^2, b_1^3, b_2^3, b_1^4, b_2^4, c_1, c_2) \quad (7.12a)$$

$$\boldsymbol{\varphi}_{k-1}^T = (-y_{k-1}, -y_{k-2}, u_{k-1}^1, u_{k-2}^1, u_{k-1}^2, u_{k-2}^2, u_{k-1}^3, u_{k-2}^3, u_{k-1}^4, u_{k-2}^4, \nu_{k-1}, \nu_{k-2}) \quad (7.12b)$$

donde y corresponde a h_s , u^1 a F_H , u^2 a σ_e , u^3 a V_e y u^4 a V_s . Mientras que los resultados de la estimación ($\boldsymbol{\theta}$) serán: los términos b_j^i (ver (7.2)) correspondientes a los coeficientes j del numerador de la función de transferencia i ; los términos a_j que serán el denominador común de dichas funciones; y los términos c_j que definen el numerador correspondiente al filtrado del ruido blanco, ver figura 7.2. El resultado, por tanto, de esta etapa, serán dos parámetros para el denominador común y otros dos para cada uno de los numeradores, en total una decena de parámetros. El factor de olvido elegido es un término que engloba en torno a las trescientas últimas muestras tomadas.

A continuación se muestra la evolución del proceso de identificación a través de un ejemplo. Se ha tomado un episodio de *chatter* de los encontrados en los datos reales, en concreto el segundo episodio de *chatter* de la figura 6.5(a). Este episodio de *chatter* recoge una secuencia de tiempo desde segundos previos al fenómeno a otros posteriores al mismo, incluyendo la rampa de deceleración (control automático ante el *chatter*) y una zona de velocidad baja. En la figura 7.3 puede observarse la evolución de las variables que forman el vector de datos de entrada y de salida (7.11). Es muy fácil notar la aparición del *chatter* por su efecto en el espesor de salida (h_s) y distinguir las diferentes zonas a través de la rampa de velocidad (previo, *chatter*, rampa, ...).

Este conjunto de datos es el utilizado para el proceso de identificación. Dadas las características de este estudio no se cree necesario comparar el resultado de la estimación con un conjunto de valores de test. Para dar una idea de la bondad del ajuste llevado a cabo, se utiliza el estadístico NMSE (7.14, *normalized mean square error*), donde se toma el error (7.13) cuadrático medio de estimación y se normaliza con respecto al error cuadrático medio

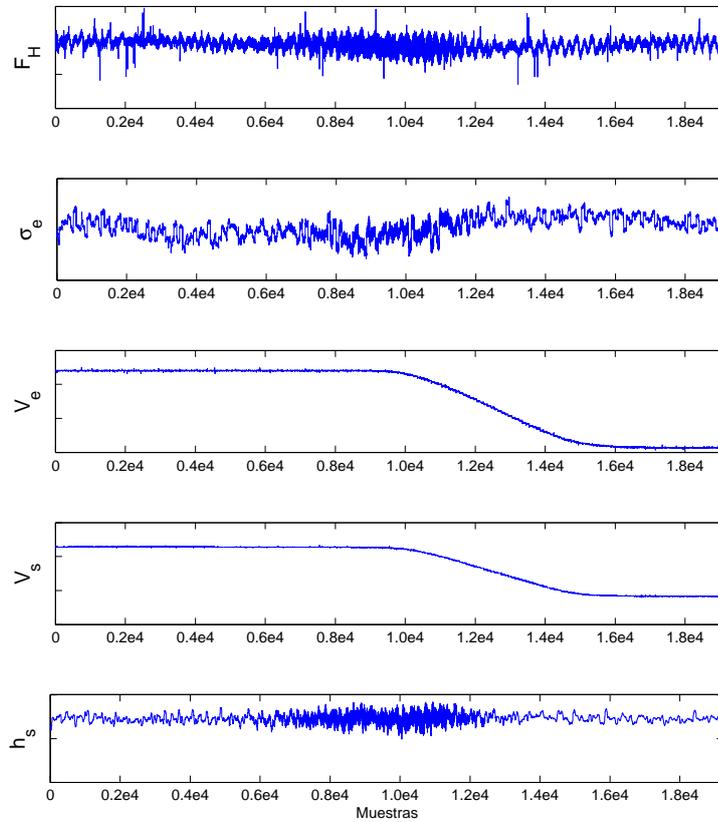


Figura 7.3: Evolución de las variables de entrada y salida utilizados para la estimación.

que habría si la estimación fuese siempre la media de la salida, que coincide con la varianza de y_k [5]. Cabe destacar que el error calculado en (7.13) coincide con la estimación del ruido (ν_k) en (7.10). La idea final será comparar la estimación del modelo utilizado con aquella que se puede considerar la más simple, la media de la muestra. Obviamente un valor mayor de uno indicaría que la media predice mejor que el modelo y por tanto éste no tendría sentido. En el caso contrario, cuanto más cercano a cero sea el valor, mejor es la estimación realizada. En la figura 7.4 se puede observar el valor de la variable de entrada (y_k) utilizada en el proceso de estimación, es decir, el espesor de salida (h_s) y el error de la misma (e_k). El valor obtenido en el NMSE es de un 1.7%, lo cual invita a validar la estimación realizada y a proseguir el estudio.

$$e_k = y_k - \hat{y}_k \quad (7.13)$$

$$NMSE = \frac{\frac{1}{N} \sum_k e_k^2}{\frac{1}{N} \sum_k (y_k - \bar{y}_k)^2} \quad (7.14)$$

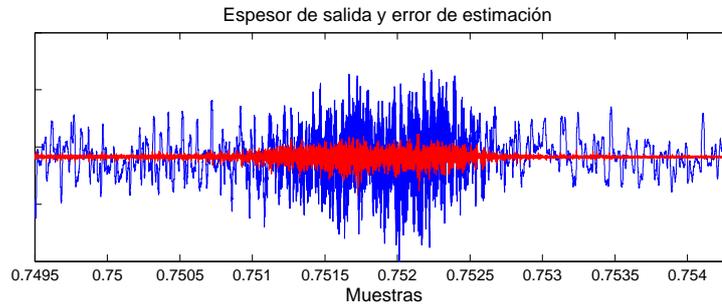


Figura 7.4: Comparación entre el término de salida (y_k) utilizado en la estimación (espesor de salida, h_s) y el error de la misma (e).

El proceso de estimación arroja el resultado de la figura 7.5. En dicha figura se observa el valor de los coeficientes del denominador común (a_1 y a_2) así como los coeficientes de los diferentes numeradores para las diferentes funciones de transferencia (7.2). Además, y a fin de facilitar la interpretación de los coeficientes, se incluye la evolución de la señal de vibración filtrada en la banda del *chatter* (ac5f) así como el perfil de velocidad de salida. Con la observación de la evolución de los coeficientes estimados es fácil notar un cambio ante la aparición del fenómeno, e incluso parece posible llegar a detectar el mismo.

Los coeficientes estimados pertenecen a funciones de transferencia en z siendo posible su paso al plano continuo para una posterior identificación de los parámetros de (7.1a). Sin embargo esta relación no es para nada evidente o inmediata. En este caso se pretende el paso de una función discreta con un cero, a una continua sin ceros, siendo imposible una definición directa. Para esta etapa se utilizará el método del bloqueador de orden cero y se despreciará el cero entregado en el proceso. Una vez con las funciones de transferencia (7.1) en el plano continuo, los parámetros de éstas, con ya un significado físico, son estimados. En la figura 7.6 se observa la evolución de los parámetros: B_m que hace alusión al coeficiente de amortiguación del sistema; y las derivadas de la fuerza respecto a la tensión de entrada, espesor de entrada y espesor de salida ($\frac{\partial F}{\partial \sigma_e}, \frac{\partial F}{\partial h_e}, \frac{\partial F}{\partial h_s}$).

En el capítulo 6 se define el parámetro B_m . Su función es clara: describe las propiedades de amortiguamiento de la caja de laminación. Sin embargo la definición del mismo y su medición es compleja por la necesidad de contemplar un gran número de parámetros mecánicos o estructurales. De todas maneras, expertos en el proceso acuerdan la alta variabilidad en el tiempo de dicho parámetro. En el estudio del capítulo 6 se toma un único valor de

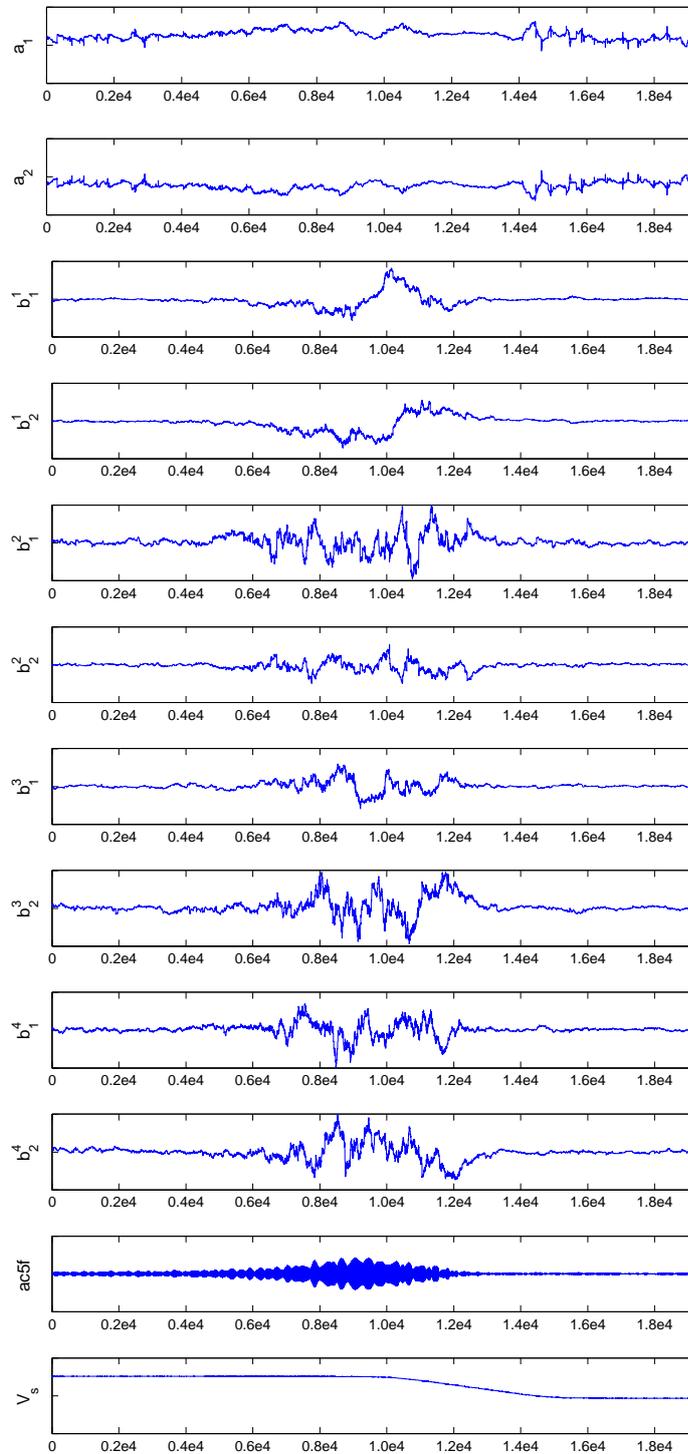


Figura 7.5: Evolución de la estimación de los coeficientes de las funciones de transferencia en z . Para b_i^j el superíndice j hace referencia a la variable de entrada: 1 - F ; 2 - σ_e ; 3 - V_e ; 4 - V_s .

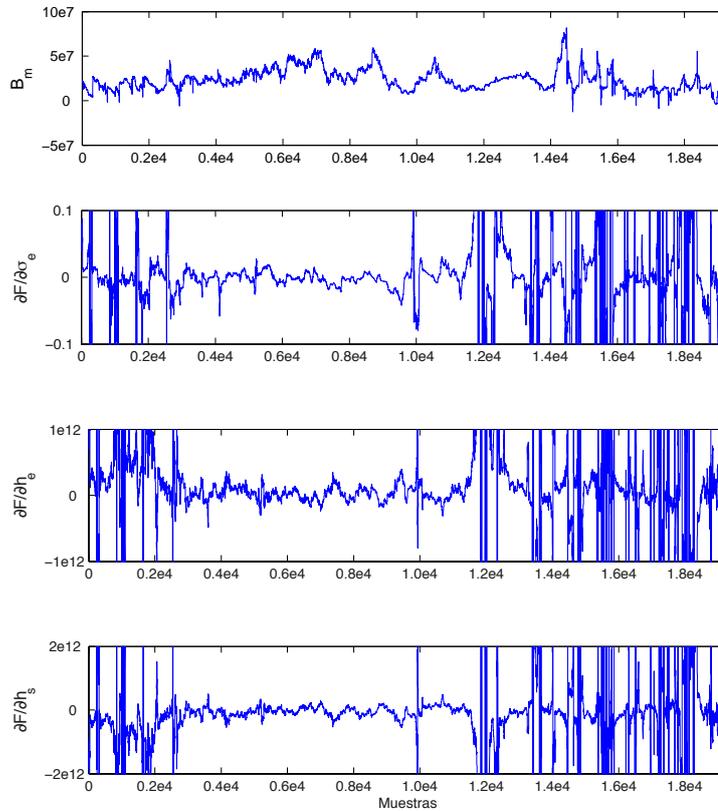


Figura 7.6: Evolución de la estimación de los parámetros físicos de las funciones de transferencia en el plano continuo. En las tres últimas gráficas se ha ajustado el eje de ordenadas para evitar una variabilidad excesiva de los datos.

B_m y se mantiene en todos los experimentos. El valor de este B_m respecto a la media del obtenido mediante identificación es solo entre un 15 %-25 % mayor, representando en cierta manera la bondad del ajuste. Sin embargo no se alcanzan valores comparables en magnitud en las estimaciones de las derivadas, seguramente achacables a: las diferencias entre los modelos estudiados, figuras 6.3 y 7.1(b); a que el modelo está orientado al fenómeno del *chatter* (curiosamente donde las estimaciones son más uniformes); al mecanismo de obtención de los parámetros de las funciones de transferencia discretas. Además es fácil observar como la estimación de las derivadas se descontrola en muchos instantes, haciendo poco fiable el proceso de cálculo de las mismas.

Como se observa en las funciones de transferencia definidas en (7.1), todas ellas comparten el denominador y además todas ellas carecen de ceros en el numerador. Por lo tanto, el estudio del denominador y, en particular,

de la evolución de los polos del mismo permitirá comprobar el grado de estabilidad relativa del sistema. Llegados a este punto, debe entenderse que el modelo aquí estudiado es un subsistema del ciclo de formación del *chatter* y por tanto el estudio de la estabilidad (absoluta o relativa) no caracteriza totalmente el proceso de formación del *chatter*, aunque sí deberá influir en buena medida en éste.

En la figura 7.7 se muestra la posición de los polos de este denominador común, en el plano discreto, para la secuencia estudiada. Puede comprobarse cómo, por un lado, muchos de ellos están dispuestos cerca del límite de la estabilidad (círculo de radio 1) y como, por otro, existe una porción de los mismos en forma compleja, demostrando por tanto un carácter oscilatorio del proceso. La interpretación de los mismo no está clara. En una representación temporal, al principio el sistema presenta polos reales, para ir generando polos complejos al acercarse el instante de *chatter*. Sin embargo en la etapa de polos reales es posible encontrar algunos fuera de la circunferencia unidad y por tanto inestables. Quizás marquen éstos el inicio del periodo de *chatter*. Sin embargo dentro de los propios instantes del fenómeno, apenas ningún par complejo se vuelve inestable, aunque sí marcan una frecuencia de oscilación semejante a la del *chatter*. En este punto cabe destacar que quizás los resultados más fiables en el tiempo sean aquellos correspondiente a la zona de *chatter*, ya que el modelo está orientado exactamente a dicho fenómeno. Sea cual sea la interpretación de los mismos parece clara la importancia del análisis de la evolución en el tiempo de los polos.

7.4. Modelado basado en datos para la identificación del *chatter*

7.4.1. Los mapas de dinámica

Como se describe en 4.2.4, el SOM es una potente herramienta de reducción de la dimensión que permite la visualización de estructuras multidimensionales de manera eficiente. Existen numerosas aplicaciones reales donde esta técnica demuestra su eficacia. Sin embargo, en la gran mayoría de los casos, esta técnica se utiliza para estudiar características estáticas dentro un proceso multivariable. A pesar de esto, es posible aplicar el SOM al análisis del comportamiento dinámico de un proceso.

El planteamiento inicial de este tipo de problemas incluye la asociación

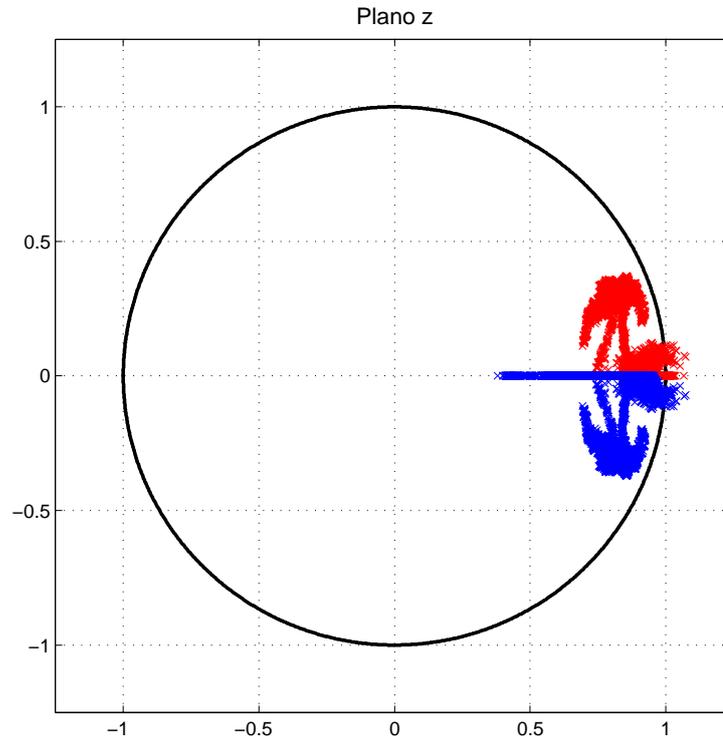


Figura 7.7: Disposición de los polos en el plano discreto (z) del denominador común de (7.1).

de modelos locales lineales a cada una de las neuronas del SOM [100][82]. Sin embargo estos trabajos están orientados más al control que a la visualización. En [24] se presenta una metodología para obtener una representación visual de la dinámica de un proceso industrial, no lineal o variante, basado en SOM. Dicho método permite llevar a cabo un análisis donde se definan un amplio rango de características dinámicas.

La base de esta metodología se encuentra en la generación de los denominados *mapas de dinámica*. Éstos son una representación ordenada en un espacio visualizable (típicamente dos dimensiones) del comportamiento dinámico del proceso, donde cada punto representa la dinámica de un modelo local definido por un vector de parámetros. Este tipo de mapas pueden ser además combinados con otras representaciones tradicionales del SOM, como los planos de componentes, permitiendo combinar la visualización de variables dinámicas con otras estáticas, en un análisis integral del funcionamiento del proceso.

La metodología de [24] establece una serie de etapas bien claras. Comienza con la definición de los modelos locales asociados a cada elemento del

SOM. Un primer paso es establecer la relación entre el conjunto de entradas y salidas y el modelo que mejor se ajusta al proceso en estudio (AR, ARX, ..., en el caso lineal, u otras estructuras en el caso no lineal). Según el tipo de modelo seleccionado, se establecen diversos parámetros funcionales como su orden. Una vez definido éste perfectamente, se lleva a cabo el proceso de identificación, obteniendo el valor de los parámetros del modelo supuesto para cada uno de las instantes de tiempo (o ventanas previamente definidas). Esta etapa concluye con la composición de un vector, de parámetros identificados, para cada uno de los instantes de tiempo.

El conjunto de vectores de parámetros identificados se utiliza en una segunda etapa para el entrenamiento de un modelo SOM, de tal manera que genere una correspondencia entre el espacio paramétrico (que define los modelos locales) con un espacio visualizable de baja dimensión. Destacar que los vectores de parámetros utilizados para el entrenamiento del SOM, pueden ser ampliados con nuevas características: otras variables del proceso o algún parámetro dinámico deducido de las funciones de transferencia. Una vez realizado en entrenamiento es posible componer nuevos mapas con las características dinámicas más adecuadas.

7.4.2. Mapas de dinámica aplicados al fenómeno del *chatter*

Como se detalla en la sección anterior, se va a suponer un modelo local lineal, de orden dos, tipo ARMAX. Este modelo es identificado a través del algoritmo RLS mediante el correspondiente procedimiento iterativo para el intervalo de tiempo considerado, obteniendo una nueva función de transferencia en cada periodo de muestreo. En las figuras 7.5 y 7.3 se observa un ejemplo ilustrativo del tipo de resultados obtenidos.

Como se detalla en la primera sección de este capítulo, con el modelo descrito se consideran cuatro funciones de transferencia, ver (7.1). Para el estudio mediante mapas de dinámica se utilizará sólo la primera de las funciones ($\frac{\Delta h_s}{\Delta F_H}$) debido a varios motivos: por un lado el nivel de fuerza experimentado puede describir adecuadamente el efecto del *chatter*; además y como se manifiesta en el resto del trabajo, la fuerza es uno de los integrantes del ciclo de formación del *chatter*; por último, es ésta la misma función que se analiza en el capítulo 6.

De acuerdo a la metodología comentado anteriormente, se construye un modelo SOM tomando como características o variables de entrada el vector de parámetros estimados para la función de transferencia (b_i y a_i). Este vector de características se expande con las entradas y salidas del proceso de identificación, la fuerza (F_H) y el valor eficaz de la desviación del espesor de salida respecto a su objetivo (error de espesor) y con las variables velocidad de salida (V_s) y valor eficaz de la señal de vibración recogida por el acelerómetro en la caja cinco. Con este grupo de características se entrena el SOM cuyos planos de componentes pueden verse en la figura 7.8. Es fácilmente observable cómo las regiones generadas en los mapas de variables reales (fuerza, vibración, velocidad y error de espesor) no parecen tener mucha correspondencia con las de los coeficientes de la estimación (b_1^1 , b_2^1 , a_1 y a_2), ver figura 7.8. Esto parece indicar que el análisis directo de los planos de componentes, formados por los parámetros estimados, no es una buena elección ya que no define con claridad el tipo de fenómeno buscado. Además existen serias dudas sobre la interpretación, en términos dinámicos, de estos coeficientes, ya que es posible que procesos de similar comportamiento dinámico puedan no tener coeficientes demasiado parecidos.

Por lo tanto es necesario definir una nueva serie de características dinámicas del proceso que reflejen de mejor manera el problema en estudio. La filosofía de esta metodología posibilita el proceso al tener disponible la función de transferencia asociada a cada elemento del SOM y por tanto, mediante las transformaciones oportunas, poder acceder a cualquier variable dinámica deseada.

La respuesta en frecuencia de un sistema puede ser una información importante sobre su dinámica. En especial, y para un proceso tan particular como el *chatter*, conocer la magnitud de la respuesta del sistema para frecuencias cercanas a la del fenómeno parece un gran aporte de información. Para ello se selecciona un grupo de frecuencias determinado: 50 Hz, 140 Hz, 145 Hz, 150 Hz y 250 Hz. De tal manera que se contemplen frecuencias muy separadas del *chatter* (50 y 250 Hz) y otras dentro del rango del fenómeno (140-150 Hz). Se aplica pues, sobre cada vector prototipo \mathbf{m}_i , la operación $|G(e^{j\theta}, \mathbf{m}_i)|$ que tomará los coeficientes de la función de transferencia y calculará la ganancia del sistema para una frecuencia normalizada θ dada.

Siguiendo con el proceso de selección de características y como se observa en la figura 7.7, durante el periodo estudiado es posible encontrar polos dispuestos sobre el eje real y en forma compleja. Es interesante conocer la distribución exacta de los mismos y su relación con el resto de variables. Para ello

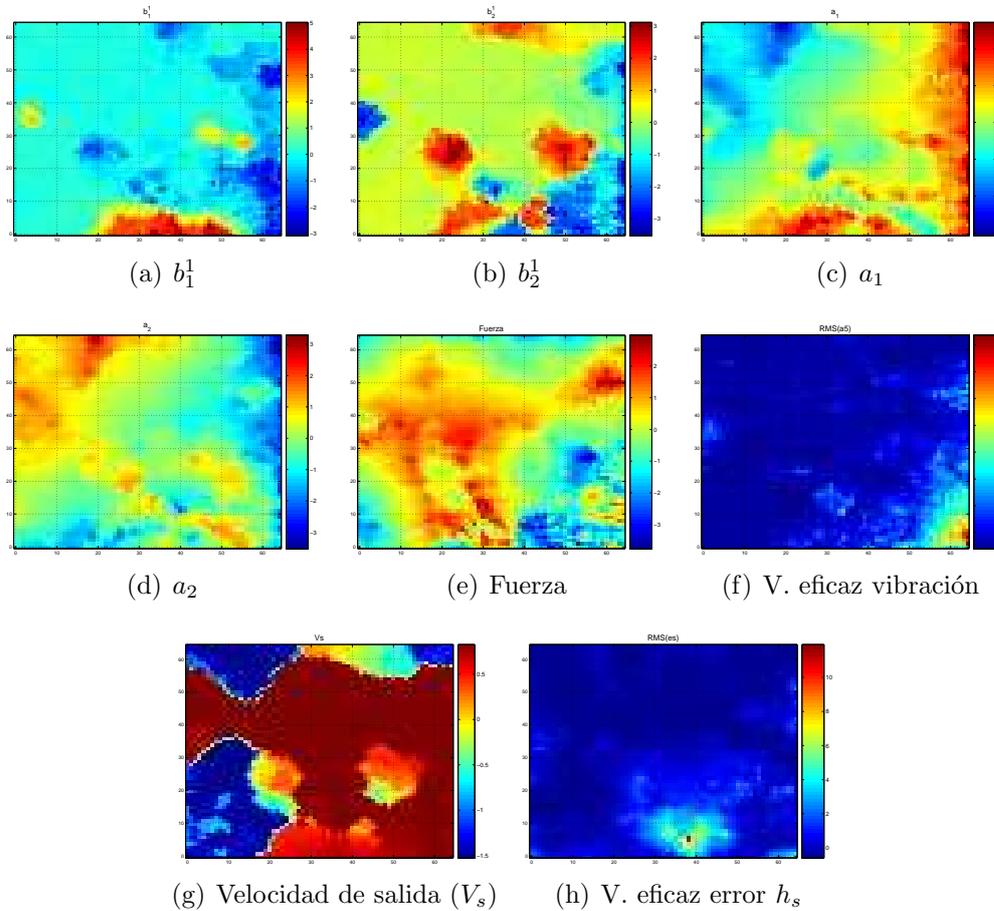


Figura 7.8: Planos de componentes del modelo SOM entrenado con los parámetros identificados.

se construyen nuevos mapas de características que muestren algún término relacionado con las características de los polos. En concreto se selecciona el término ω_d , parte imaginaria del polo en el plano continuo o frecuencia natural amortiguada.

Por último se amplía este vector con las características anteriores: valor eficaz del error de espesor; la variable velocidad de salida (V_s) y el valor eficaz de la señal de vibración recogida por el acelerómetro de la caja cinco.

En la figura 7.9 se observan los mapas generados. Puede verse a lo largo de las figuras 7.9(a), 7.9(b), 7.9(c), 7.9(d) y 7.9(e) el contenido frecuencial de cada uno de las unidades del SOM, definiendo así las neuronas relacionadas con el episodio de *chatter*. La identificación de puntos pertenecientes al episodio de *chatter* se confirma a la vista del plano de velocidad de salida, ver figura 7.9(h), donde la zona de alta, baja velocidad y la pendiente de

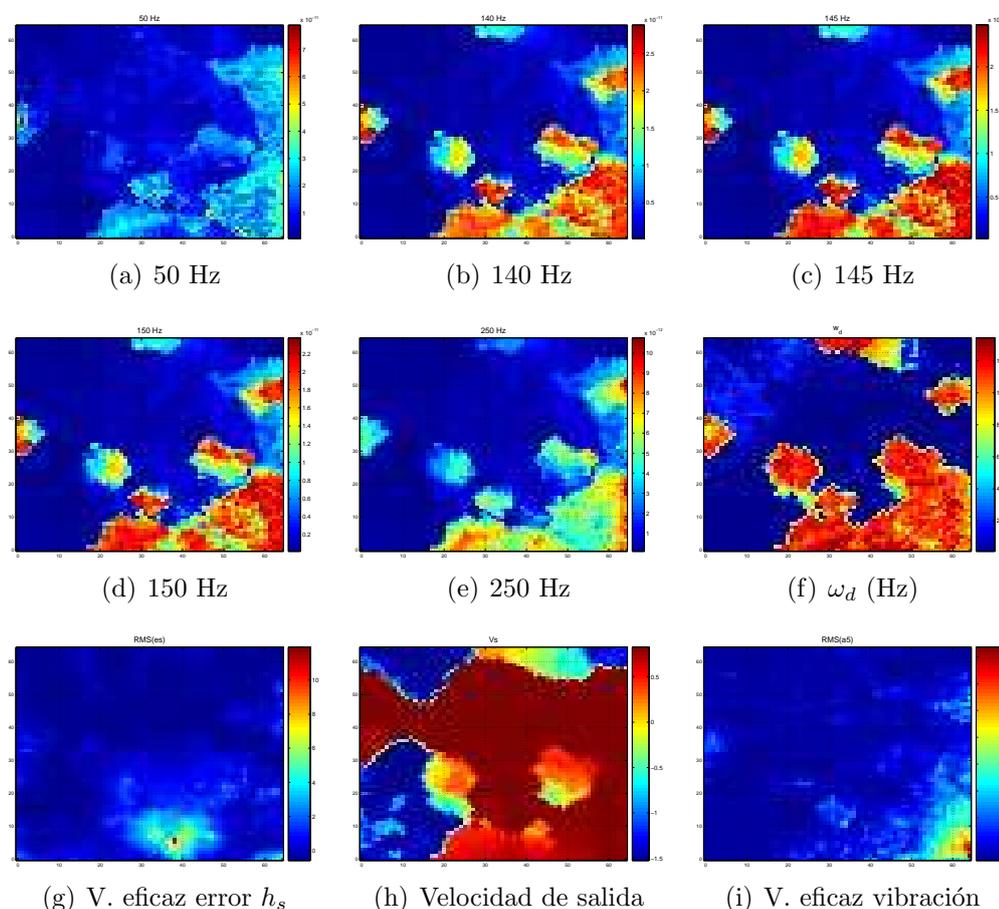


Figura 7.9: Mapas dinámicos.

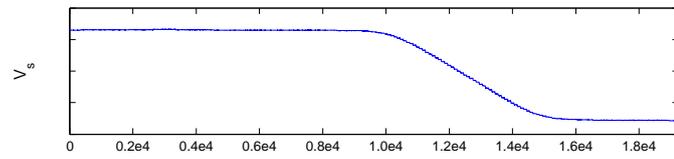
deceleración pueden distinguirse. Mediante el plano del error en el espesor de salida 7.9(g) se comprueba como la zona de peor calidad (puntos rojos) se corresponden con el fenómeno del *chatter*. Un razonamiento análogo puede seguirse con la señal de vibración en el plano, ver figura 7.9(i). Pero la mayor aportación es sin duda la del mapa de ω_d , ver figura 7.9(f). Se aprecia con claridad como los valores altos de ω_d coinciden con aquellos de alto contenido frecuencial en el rango del fenómeno del *chatter* (alrededor de 150 Hz). Para reafirmar esto, es fácil comprobar como este alto valor de ω_d , obtenido a través de las funciones de transferencia identificadas, abarca las zonas de alto error de espesor de salida y vibración, ambas variables obtenidas a través de una medición directa en la instalación (aunque desgraciadamente no exactamente en el mismo punto). Por lo tanto parece que a través del cálculo y estudio del parámetro ω_d , es posible unir los resultados del modelo y de la realidad en referencia a la formación del *chatter*.

El análisis mediante mapas de dinámica parece confirmar, para un modelo de estas características, la importancia del comportamiento del término ω_d para el análisis del *chatter*. Este tipo de conclusiones, no han sido alcanzadas antes hasta el análisis mediante mapas de dinámica, mostrando un ejemplo más con el que probar la utilidad de éstos. El siguiente paso obliga pues, a profundizar sobre la evolución de los polos del sistema durante el fenómeno del *chatter*. Para ello se representa el valor de los mismos en comparación con el perfil de velocidades. En la figura 7.10(c) se observa el valor del parámetro ω_d en el tiempo, pudiéndose comparar con el perfil de velocidades en la figura 7.10(a) y el valor eficaz de la vibración de la caja 5 en la figura 7.10(b). A la vista de dicha evolución parece claro cómo los polos del sistema se vuelven complejos a medida que se acerca el fenómeno del *chatter*, acercándose a las frecuencias propias del fenómeno del *chatter* (en torno a 150 Hz).

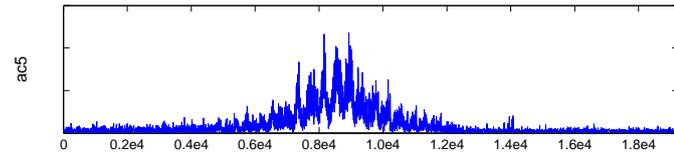
Se ha calculado el término α ($s = -\alpha \pm j\omega_d$) para todas las funciones de transferencia estimadas. En caso de contar con polos reales se seleccionó el de menor módulo (polo dominante). Como se puede observar en la figura 7.10(d), los polos del plano s se encontrarán más cercanos al origen en los momentos que no corresponden al *chatter*, que cuando se manifiesta el fenómeno. De cualquier modo el análisis continuado del fenómeno ha procurado una curiosa observación. En la figura 7.10(e) se puede observar la evolución del módulo de los polos ($|z|$) en el plano z . Es fácil observar como en el mismo instante de *chatter* la estimación de $|z|$ se hace más homogénea. Para un mejor aprovechamiento de esta singularidad, en la figura 7.10(f) se representa la desviación típica de $|z|$, haciendo patente con claridad el instante de *chatter*. Para una mejor identificación, en la figura 7.10(g), aparece esta misma desviación típica, pero filtrada a través de un filtro de medias móviles.

7.4.3. Aplicación del conocimiento adquirido

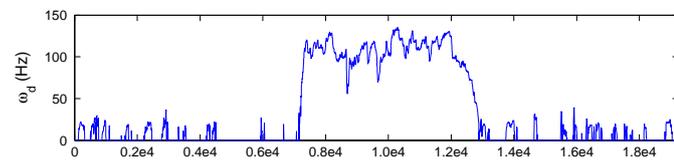
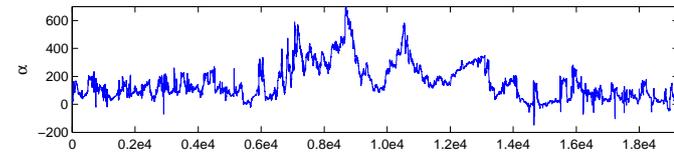
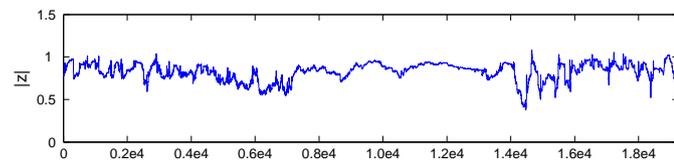
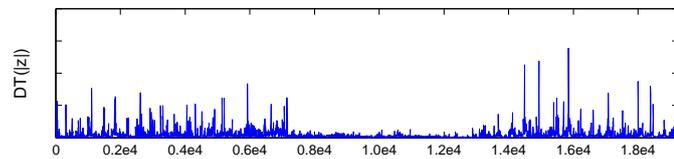
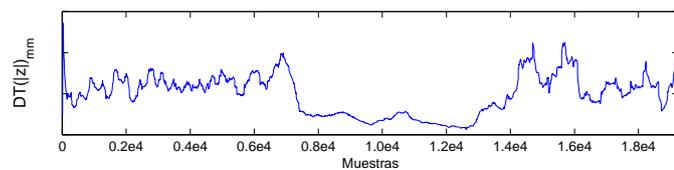
A fin de aprovechar el conocimiento adquirido con las observaciones anteriores, se trata ahora de lograr una identificación eficaz del fenómeno del *chatter*. Dado que los términos ω_d y $|z|$ parecen acotar bien el fenómeno del *chatter*, se aprovecharán para componer un modelo SOM orientado a la detección del fenómeno. Dicho modelo SOM vendrá definido por las siguientes variables: respuesta frecuencial a 145 Hz; ω_d ; la desviación típica de $|z|$; el valor eficaz de la vibración en la caja cinco y la velocidad de salida. Como datos de entrenamiento se utilizarán dos *casos* de *chatter*, en concreto el primero y segundo de 6.5(a). En la figura 7.11 pueden verse los planos de componentes



(a) Velocidad de salida.



(b) Valor eficaz vibración caja 5.

(c) ω_d (d) α (e) $|z|$ (f) Desviación típica de $|z|$.(g) Desviación típica de $|z|$ suavizada (medias móviles).**Figura 7.10:** Evolución de los polos en un episodio de *chatter*.

asociados al modelo. Se comprueba como el área de *chatter* definida por la ganancia a 145 Hz, ver figura 7.11(a), corresponde con los valores máximos de ω_d , ver figura 7.11(b). Al mismo tiempo dicha área contiene la máxima vibración en la caja 5, ver figura 7.11(d). Por otro lado la desviación típica de $|z|$, en la figura 7.11(c), tiene un área limitada en sus valores bajos, coincidente con los valores altos de ω_d , remarcando así los comentarios de la sección anterior. En la figura 7.11(f) se representa además el mapa de distancias.

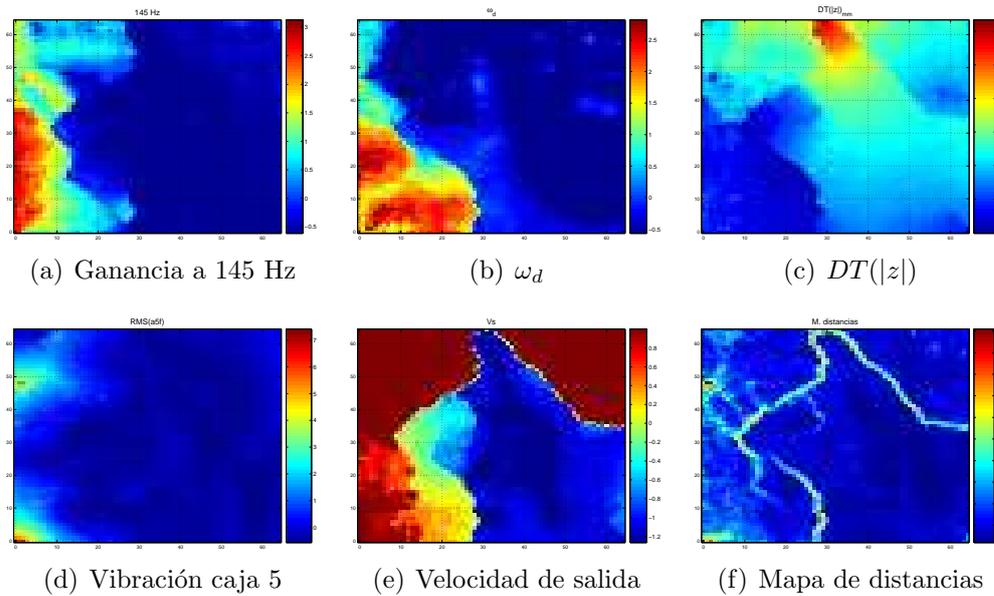
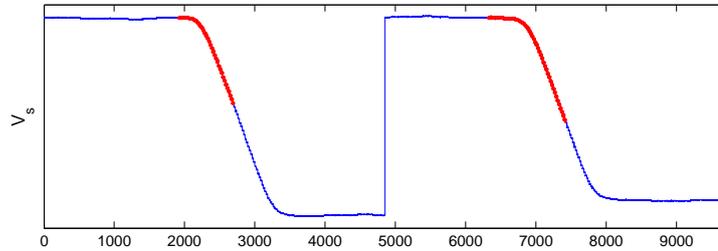


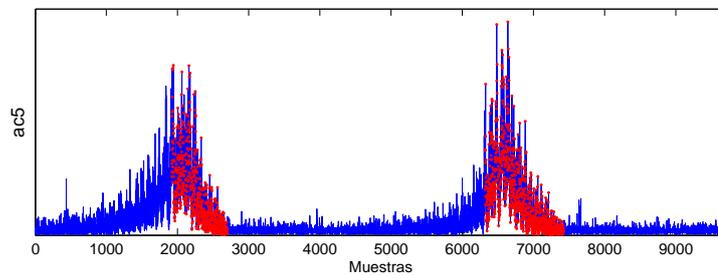
Figura 7.11: Modelo SOM entrenado con las características dinámicas seleccionadas para una correcta identificación del *chatter*. Se incluye la ganancia del sistema a 145 Hz y los parámetros dinámicos ω_d y desviación típica de $|z|$ suavizada, además de la señal de vibración y velocidad de salida.

Sobre el mapa de distancias anterior, figura 7.11(f), se definió con claridad la zona correspondiente a una condición de *chatter*. Para ello se seleccionaron todos los puntos, dentro del grupo de datos de entrenamiento, que coinciden con el fenómeno del *chatter* (según el criterio de una ω_d alta y una desviación típica de $|z|$ baja). En las figuras 7.12(a) y 7.12(b) se marcan los mismos sobre el perfil de velocidad de salida y el valor eficaz de la vibración respectivamente. Estos puntos se proyectan sobre el modelo SOM entrenado, agrupándose en una misma área, ver 7.12(c). La figura 7.12(d) es un mapa de activación que muestra, a través de un código de colores, un valor relacionado con la cantidad de veces que cada neurona fue seleccionada como *BMU*. En el mismo se comprueba como la zona de *chatter* se agrupa en una de las esquinas del espacio de visualización de salida. Este área, por tanto, aglutinará un

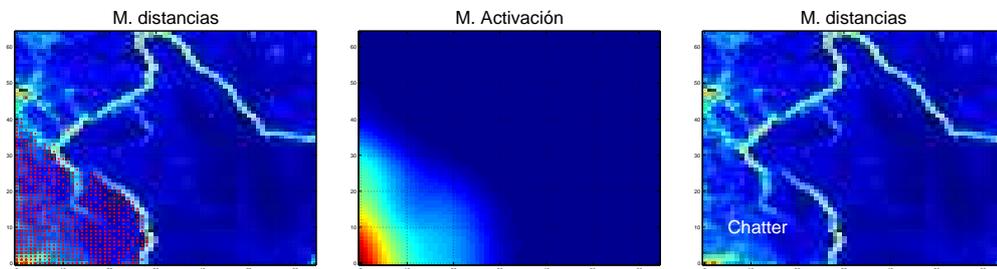
conjunto de estados iguales, definiendo así la condición del *chatter*. Como tal se etiqueta dicha área, ver figura 7.12(e).



(a) Perfil de velocidad.



(b) Valor eficaz de la vibración en la caja 5.



(c) Proyección de los puntos de *chatter* (d) Mapa de activación de los puntos de *chatter* (e) Condición etiquetada de *chatter*

Figura 7.12: Identificación de la condición de *chatter*.

A continuación se compone un grupo de datos tal que contenga instantes de *chatter* y otros de no *chatter*, con el fin de comprobar el rendimiento del modelo. En este sentido se seleccionaron una docena de bobinas con un episodio claro del fenómeno. Sobre cada una de ellas se extrajo un punto correspondiente al área de *chatter* (punto con mayor energía en la banda del *chatter* de la señal de vibración), así como otros puntos no pertenecientes al fenómeno, en concreto puntos inmediatamente anteriores al fenómeno a una velocidad alta de laminación, y otros posteriores al *chatter*, tras el periodo

de desaceleración y por tanto a baja velocidad. Este conjunto de puntos se proyecta sobre el modelo SOM definido. En la figura 7.13 pueden verse los resultados. Claramente los puntos de *chatter* se proyectan sobre la zona anteriormente definida con dicha condición, ver figuras 7.13(a) y 7.13(b). Por otro lado el conjunto de datos de no *chatter* están perfectamente separados de la condición de *chatter*: 7.13(c), 7.13(d), 7.13(e) y 7.13(f). Parece, por tanto, que el comportamiento del modelo es satisfactorio para un proceso de identificación del fenómeno.

Por último se seleccionó una bobina con un episodio de *chatter* claro y se identificaron las muestras bajo la condición de *chatter* a través del modelo entrenado. En la figura 7.14 pueden observarse todos los puntos dentro de la condición de *chatter* en el mapa de distancias, con su correspondencia en la señal de valor eficaz de la vibración filtrada en la banda del *chatter* y en la velocidad de salida, así como la ubicación de los polos en el plano z . A través del modelo SOM generado, el estado de *chatter* es detectado en torno a un segundo y medio antes que en la propia instalación (tomado éste como el instante en que comienza la rampa de desaceleración).

Esta diferencia de tiempo en la identificación del fenómeno permite que la banda se vea afectada por mucha menos energía vibratoria (recordar que el crecimiento de esta energía es muy rápido) y el sistema mecánico sometido a menores esfuerzos. Además se puede combinar este resultado con el criterio de velocidad crítica en (6.7), para llevar a cabo una desaceleración no tan pronunciada y por tanto perjudicar menos al ritmo de producción (uno de los principales inconvenientes del *chatter*).

Sin embargo no es posible, con los datos disponibles en este estudio, observar el rendimiento del sistema actual en planta en el caso de disminuir su umbral de vibración. Cabe suponer que el mismo esté ajustado a fin de evitar falsas alarmas, motivadas por alguna clase de vibración forzada en una banda similar a la del *chatter*. De cualquier manera en ningún momento se ha tratado de comparar de manera seria el rendimiento del sistema actual y el de este modelo, ya que por ejemplo, la situación de una vibración forzada en tercera octava, no ha sido posible experimentarla sobre el modelo aquí descrito al no disponer de datos reales con estas características. De cualquier manera no se debe olvidar que una de las características observadas en el *chatter* es su formación y crecimiento casi instantáneos (ver capítulo 5), algo no habitual en una vibración forzada, típicamente más dependiente de la velocidad de giro de algún mecanismo.

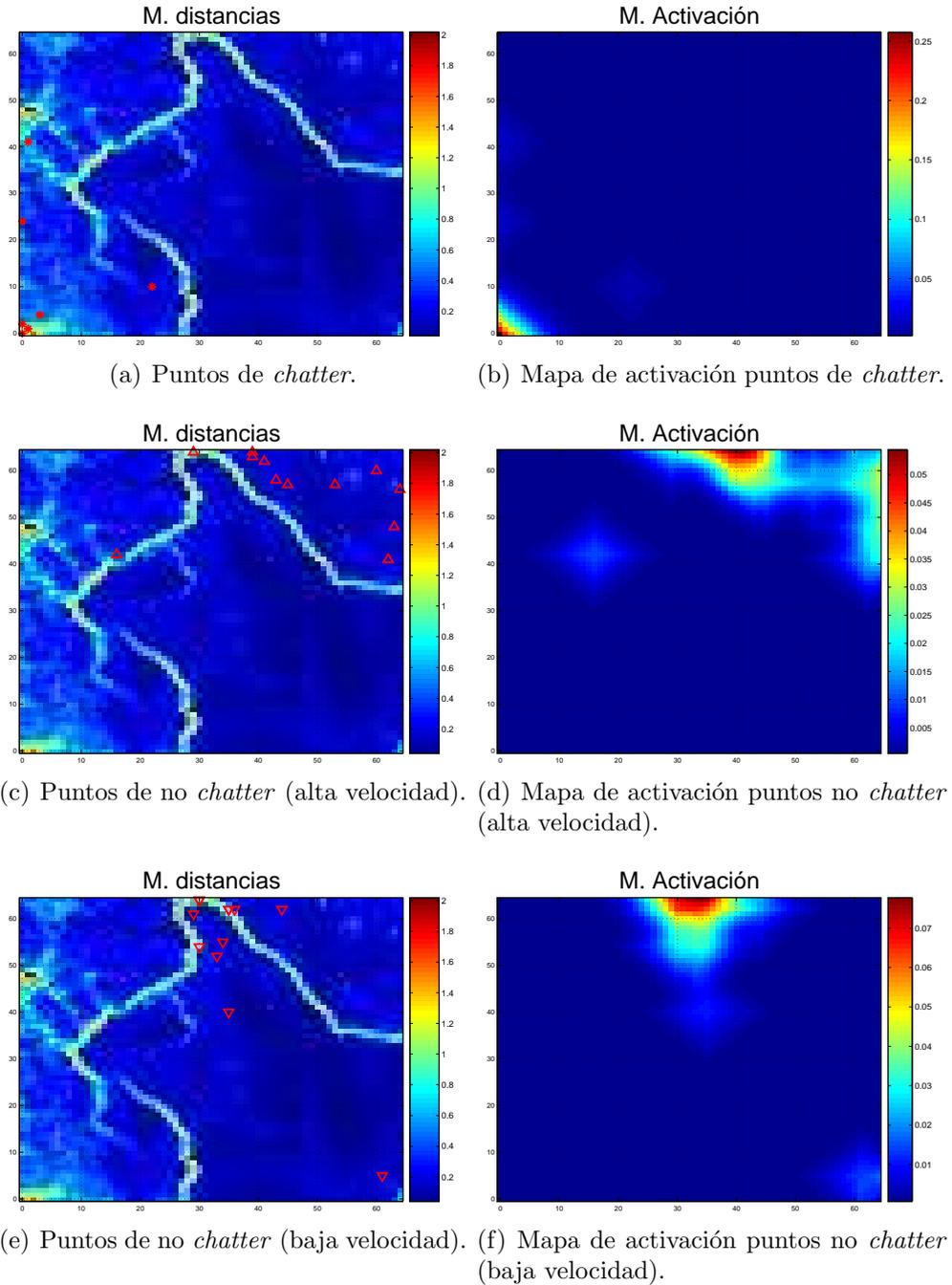


Figura 7.13: Comprobación modelo.

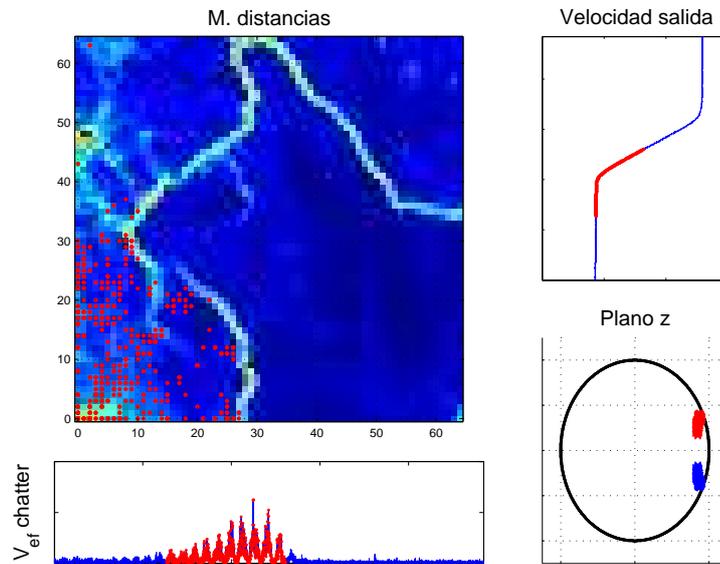


Figura 7.14: Identificación del *chatter* sobre una bobina a través del modelo SOM.

Todos los resultados aquí mencionados han de ser tomados con cierta reserva, no siendo intención del autor establecer ningún tipo de proposición de ámbito absoluto. Además, sobra decir que todas las tareas de este enfoque han de ser evaluados de manera más cuidadosa. De cualquier manera el descrito en esta tesis aparece como un problema interesante, donde además el estudio dinámico llevado a cabo representa un enfoque original y novedoso del mismo.

Capítulo 8

Resumen y discusión final

8.1. Conclusiones

El contenido de esta tesis es eminentemente práctico, buscando alcanzar dos objetivos principales. Por un lado servir como ejemplo y sentar las bases de futuros estudios basados en datos de procesos industriales complejos. Por otro arrojar un poco más de luz sobre el proceso vibratorio llamado *chatter* presente en la laminación en frío de acero.

8.1.1. El modelado basado en datos

Los procesos de minería de datos son una manera ardua y trabajosa de abordar el estudio de un proceso real. El propio proceso de toma de datos es muy influyente en el rendimiento de las herramientas de minería. La elección de las variables y de un muestreo apropiado así como la tolerancia a los fallos y la robustez del sistema de adquisición son parámetros a tener en cuenta.

Dentro de esta primera fase de adquisición es necesario enfrentarse a la cuestión sobre la cantidad de datos necesaria para llevar a cabo un estudio eficaz. Un estudio completo requiere de una representación, dentro del conjunto de datos, de todos los estados posibles de funcionamiento del proceso. A pesar de parecer trivial, es muy difícil alcanzar esta meta, más aún si lo que se pretende es el estudio de estados o condiciones anormales, caso de fallos por ejemplo. Algunos procesos son secuenciales y muy restringidos, facilitando el establecimiento de etapas y estados de funcionamiento y por tanto de recogida de datos. Otros muchos tienen una naturaleza más compleja y las variables que lo describen pueden tener un rango más amplio de funcionamiento.

La selección de variables es otra etapa importante en un proceso de minería de datos. Esta debe hacerse siempre con un conocimiento mínimo del proceso real a fin de discernir la importancia de cada una. Existen conocidas herramientas, como PCA o las matrices de correlaciones, que pueden ayudar en este proceso desvelando los posibles grados de relación entre variables, información fundamental en cualquier estudio. Muchas son las técnicas utilizables en un proceso de minería de datos: cualitativas o cuantitativas; estadísticas, redes neuronales, ... Sin embargo, y dada la capacidad del ser humano para el reconocimiento de patrones a través del sentido de la vista, se considera adecuado la elección de un enfoque visual para el uso de todas estas herramientas en un proceso industrial real.

Dentro del enfoque basado en datos y considerando un proceso complejo de las características del de este trabajo (gran cantidad de datos, alta variedad de puntos de funcionamiento, ...), el de las redes neuronales y en especial aquellas no supervisadas, son las seleccionadas para el estudio del proceso industrial real. En este sentido el SOM por su capacidad de cuantización y carácter no lineal es utilizado en este trabajo como herramienta principal, ver sección 4.2.4. Además, no se debe olvidar las características visuales de esta técnica a través de la construcción de planos virtuales sobre el modelo. La aplicación del modelo generará un vector de residuos de cuya interpretación depende el análisis del proceso (en este caso visual), ver sección 4.3. Sin embargo es necesario tener en cuenta el objetivo final del estudio para un correcto uso de estas técnicas. Se distinguen dos tipos de casos: aquellos donde se analiza algún indicador de calidad y las causas de un deterioro en el mismo; y aquellos donde se trata de detectar y caracterizar un nuevo estado. En cada caso el análisis del residuo debería ser diferente.

Mucho de los estudios de procesos industriales mediante SOM tratan de buscar relaciones estáticas entre variables. Sin embargo, a veces se tratan procesos o fenómenos cuya complejidad y evolución hacen poco recomendable este enfoque, siendo necesario primar las características dinámicas en el análisis. En este sentido los mapas de dinámica pueden aportar valiosa información al estudio. De esta manera el modelo SOM no solo revelará relaciones entre variables, sino que capturarán las características dinámicas propias de cada una de las condiciones que el SOM pudiese definir. Dentro de la metodología propia de generación de mapas de dinámica, este trabajo recomienda no quedarse únicamente con la información aportada por la interpretación de los coeficientes estimados, ver sección 7.4.2. Será necesario la definición de una serie variables dinámicas específicas, determinadas, muchas veces, por el

conocimiento experto que se posea del proceso.

8.1.2. El *chatter* en el proceso de laminación en frío

Mucho más específicas son las conclusiones obtenidas sobre el fenómeno del *chatter*, mediante el proceso de minería de datos visual llevado a cabo. En primer lugar se ha caracterizado, con los datos disponibles, el fenómeno del *chatter* de manera cualitativa y cuantitativa, mediante el estudio de la evolución en el tiempo y la representación espectrográfica de algunas variables, ver capítulo 5. Su aparición repentina y rápido crecimiento son prueba del carácter autoexcitado del fenómeno frente a un origen forzado, ver sección 5.1.1¹. Además y a través del modelo presentado en el capítulo 6, las diferencias en la frecuencia exacta de expresión del fenómeno (ver figura 5.2) pueden ser explicadas. Del análisis se desprende además que el fenómeno parte de la última caja de laminación transmitiéndose aguas arriba, ver sección 5.1.2². En general el capítulo 5 trata de acabar con el uso indiscriminado del término *chatter* en la industria actual, separándolo de otras vibraciones forzadas de frecuencia similar.

Por otro lado se muestra el auténtico impacto negativo del *chatter* en la línea estudiada: el descenso, necesario para su eliminación, de la velocidad de laminación. En esta línea y apoyado en las teorías clásicas de formación del fenómeno, se construye un modelo simple para su simulación. Tomando varios puntos de funcionamiento de la planta real, se utiliza el modelo para estudiar la estabilidad del proceso ante diferentes parámetros, ver tabla 6.3. El estudio se centra especialmente en la influencia de la velocidad de laminación, elaborando un criterio simple (6.7) para el cálculo de la velocidad crítica de laminación o límite a partir del cual el proceso se vuelve inestable.

Por último, el uso general de secuencias de datos reales, pertenecientes a episodios de *chatter*, sobre la evolución del modelo anterior, permitió un análisis más profundo del fenómeno. La aplicación de los denominados mapas de dinámica (ver capítulo 7) permitió capturar la evolución de los polos del sistema ante el fenómeno del *chatter* (ver figura 7.7), permitiendo, por un lado, identificar algunas de las características dinámicas más relacionadas con el fenómeno y por otro, utilizar este conocimiento para generar modelos SOM capaces de identificar y caracterizar el fenómeno, ver sección 7.4.2 y

¹Ver apartados *La lucha contra el chatter y Consecuencias del chatter y de lo que no es chatter*

²Ver apartado *Interacción entre cajas*

7.4.3.

8.2. Aportaciones

Son varias las aportaciones de esta tesis:

- Se plantea un estudio basado, enteramente, en datos reales provenientes de una instalación industrial de primer orden, condición poco abundante en la bibliografía manejada. En este sentido es posible observar el comportamiento real de las variables, así como experimentar todas las restricciones que una instalación de este tipo posee.
- Los diferentes análisis se llevan a cabo bajo una filosofía netamente visual, utilizando herramientas gráficas como la representación mediante espectrogramas de diversas señales del tren. Un ejemplo de acercamiento netamente visual a un proceso de laminación (en este caso en caliente) fue presentado en [35] el *12th Engineering Applications of Neural Networks* (EANN'11).
- Este estudio aporta una posible definición más precisa del fenómeno del *chatter*, necesaria en vista del abuso del término en la industria moderna. Desde un punto de vista práctico, se señalan las características propias que lo diferencian de otras vibraciones forzadas, dentro de la banda de tercera octava: crecimiento exponencial, aparición súbita, ... A la vez que se reafirma su carácter autoexcitado. Sentando las bases de un criterio que normalice el uso del término *chatter*.
- Se llevan a cabo reflexiones (ver capítulo 5) sobre el fenómeno del *chatter* basadas en el análisis comparativo de la evolución de las variables de laminación (fuerza, tiro, ...) y la esperada a partir de la teoría clásica de laminación. Múltiples aspectos son tenidos en cuenta, como por ejemplo los mecanismos fundamentales de transmisión del *chatter*. Se comprueba, en la serie de datos en estudio, como el *chatter* aparece en la mayoría de los casos en la última caja del tren, con un mecanismo instantáneo de transmisión aguas arriba, ver sección 5.1.2³. También se ilustran las consecuencias del *chatter* en una planta industrial real, entre ellas se demuestra la más importante, el impacto sobre la velocidad media de laminación. Destacar el interés mostrado sobre el curioso

³Ver apartado *Interacción entre cajas*

fenómeno por el cual la frecuencia de expresión de la vibración (típicamente 150 Hz en el tren en estudio) presenta una cierta variabilidad (aparecen episodios en un rango de entre 140-160 Hz), ver figura 5.2.

- Basado en la idea de interacción entre fuerza y tensión para la formación del *chatter*, se construye un modelo a fin de recrear el mismo. Se trató de simplificar, en la medida de lo posible, este modelo de carácter lineal. Mediante el uso del modelo y el ajuste correcto de sus parámetros fue posible simular el fenómeno del *chatter*. El análisis de este modelo permitió explicar de manera satisfactoria el fenómeno de variación de la frecuencia de *chatter* mencionado en el punto anterior (ver sección 6.2). Por otro lado, gracias a este modelo, se llevó a cabo un estudio sobre la aportación a la estabilidad del sistema de los diversos parámetros constituyentes (ver tabla 6.3). Pudiéndose utilizar estas conclusiones como ayuda a la mejora de la estabilidad tanto en la operación de la línea como en el diseño de nuevas instalaciones.
- El modelo anterior permite establecer un criterio de velocidad crítica de fácil entendimiento, basado en parámetros constructivos de la instalación y características propias del proceso de laminación, ver (6.7). Este criterio puede ser utilizado no solo para limitar la velocidad de proceso, sino para reducir el escalón de bajada de velocidad, que se aplica a la línea, tras un episodio de *chatter*.
- Se plantea el problema del estudio de procesos complejos a través de modelos basado en datos, especialmente SOM. La importancia de la correcta generación e interpretación de residuos sobre este tipo de modelos se ha hecho patente, ver sección 4.3. Además, se han tratado de comparar los residuos generados por SOM y por PCA (técnica ampliamente difundida), señalando sus diferencias fundamentales. Por último se marcan unas pautas para la composición, ensayo e interpretación de residuos SOM sobre un proceso industrial. Todas estas ideas fueron presentadas en [72] el *5th International Scientific Conference on Physics and Control* (Physcon'11).
- La evolución del modelo en el capítulo 7 permite el análisis del mismo con un conjunto de datos reales. Gracias a éste, el *chatter* se estudia desde el punto de vista dinámico, utilizando para tal fin los denominados mapas de dinámica. Bajo las premisas de esta herramienta se llevó a cabo un proceso de identificación de las funciones de transferencia que describen el modelo, permitiendo visualizar la evolución de los

polos del sistema durante un episodio de *chatter* (ver figura 7.7).

- La aplicación de la metodología, de los mapas de dinámica, a un caso real permitió plantear una serie de pautas para aumentar la utilidad de la misma. En concreto se cuestiona la utilidad del análisis directo de los coeficientes estimados de las funciones de transferencia, ver figura 7.8. En lugar de esto se recomienda la definición de una serie de parámetros dinámicos relacionados con el proceso, derivados en su mayor parte de un conocimiento previo del mismo. En concreto para el proceso de *chatter* se señala como parámetros dinámicos críticos: la frecuencia natural amortiguada (ω_d); la ganancia a la frecuencia del *chatter* y el factor de amortiguamiento real (α).
- Con la incorporación de las características dinámicas anteriores se generó un modelo SOM capaz de identificar correctamente el fenómeno de *chatter*, permitiendo así definir la condición de *chatter* dentro del funcionamiento de la línea. Además, este modelo parece detectar el fenómeno de manera algo más temprana, abriendo la puerta a una reducción de la incidencia del fenómeno (ver sección 7.4.3).

8.3. Líneas futuras

Las líneas futuras de investigación vienen dadas, por un lado, por las limitaciones encontradas en este estudio: calidad de los datos, simplificaciones de modelado, ...; y por otro lado por los nuevos interrogantes que surgen del análisis llevado a cabo. En general cabe citar:

- Es necesario ampliar el estudio a un mayor número de bobinas en condiciones de laminación diferentes e incluso de otras instalaciones. De la misma manera sería ventajoso incluir un mayor número de variables que complementen el estudio. Por ejemplo y de ser posible, disponer de lecturas del error de espesor en todas las cajas o de un mayor número de acelerómetros en diferentes posiciones puede ser una gran ayuda. Sin embargo esto no debe llevarse a cabo sin antes tratar ciertos problemas como el muestreo de la tensión. Destacar en este punto que ha sido imposible probar las hipótesis sobre el desfase entre fuerza, tensión y espesor durante el *chatter*. Una captura mejorada podría abrir esta puerta. Siguiendo con la idea de ampliación y para llevar a cabo una validación más rigurosa de los modelos definidos, convendría obtener muestras de episodios vibratorios, de la misma frecuencia del *chatter*,

pero con un origen claramente forzado.

- Muchas son las simplificaciones llevadas a cabo en el modelado del proceso de laminación. La más importante sin duda es la asunción de no deslizamiento, motivada por la incapacidad de estimación del coeficiente de rozamiento del proceso. Puede ser positivo el avance en este término, no solo por la aportación inmediata a este estudio, sino por el amplio campo que puede abrir una herramienta de estimación del grado de rozamiento para una línea de laminación. Además se podría avanzar en el modelado mismo de la caja de laminación, presentando un sistema con varios modos de vibración, o con una mayor descripción de los parámetros de amortiguamiento y rigidez por ejemplo. De cualquier manera y a la hora de eliminar simplificaciones, no debe olvidarse nunca el enfoque práctico del estudio y la intención última de no elevar demasiado el grado de complejidad conceptual del mismo.
- La aportación a la estabilidad de las diferentes variables contempladas deberán ser ordenadas por su orden influencia a la estabilidad total. De esta manera podría ser posible explicar, en cuanto al aporte relativo de cada una, observaciones dispares encontradas en la literatura.
- La estimación llevada a cabo en el proceso de mapeo dinámico presenta varias interrogantes. Por ejemplo el paso de discreto a continuo no está perfectamente definido y es de suma importancia. En general sería muy recomendable alcanzar una estimación de las derivadas parciales de fuerza respecto a tensión y espesores mucho más fiable. Por otro lado y a pesar del gran avance que supone la visualización de los polos (ver figura 7.7), la información arrojada es a veces difícil de interpretar. Sería necesario ahondar en el tipo de resultados más peculiares para así apuntar sus posibles causas: un error de estimación o un nuevo aspecto a tener en cuenta. En general una revisión del modelo con datos reales podría ser beneficiosa desde el punto de vista de la interpretación de resultados.
- Dada la existencia de un modelo SOM dinámico capaz de identificar el fenómeno *chatter*, puede ser importante la inclusión de un mayor número de variables sobre el mismo, de tal manera que se pueda comparar ciertos aspectos del proceso (en el caso de la laminación las condiciones

de lubricación pueden ser un buen ejemplo) y determinar así su incidencia sobre la aparición del fenómeno. Como se comenta también en la sección anterior, combinar el sistema de identificación con el criterio de velocidad crítica puede convertirse en una mejora al sistema actual de detección y eliminación del *chatter*. Llevar a cabo esta tarea, así como un estudio riguroso que pruebe dicha mejora parece un camino prometedor.

- Dentro del apartado que analiza el residuo generado por un modelo SOM aparecen muchos puntos intrigantes, la mayoría relacionados la interpretabilidad del mismo. Es necesario establecer perfectamente respecto a qué condición del proceso se calcula el residuo. Es decir, que el mismo tenga sentido físico y describa con precisión el alejamiento del proceso al punto de funcionamiento esperado en ese instante. Otro problema menor, aunque importante, es la influencia del escalado en la representación visual del residuo. Este escalado no debe alterar la importancia relativa entre las componentes del vector de residuos, sino que ha de resaltar las variaciones realmente significativas para el proceso.
- Por último y sin duda la tarea prioritaria, es la síntesis e implementación de todo este conocimiento en la forma de modelos utilizables en tiempo real en la propia instalación real industrial. De tal manera que se evalúe no solo su desempeño sino también el nivel de integración y utilidad en la operación diaria de la línea.

Anexo A

Lista de variables

Nº	Nombre	Muestreo	Unidades	Descripción
1	FO1	2 kHz	Tm	Fuerza hidráulico lado operador caja 1
2	FM1	2 kHz	Tm	Fuerza hidráulico lado motor caja 1
3	FO2	2 kHz	Tm	Fuerza hidráulico lado operador caja 2
4	FM2	2 kHz	Tm	Fuerza hidráulico lado motor caja 2
5	FO3	2 kHz	Tm	Fuerza hidráulico lado operador caja 3
6	FM3	2 kHz	Tm	Fuerza hidráulico lado motor caja 3
7	FO4	2 kHz	Tm	Fuerza hidráulico lado operador caja 4
8	FM4	2 kHz	Tm	Fuerza hidráulico lado motor caja 4
9	FO5	2 kHz	Tm	Fuerza hidráulico lado operador caja 5
10	FM5	2 kHz	Tm	Fuerza hidráulico lado motor caja 5
11	VC1	2 kHz	m/min	Velocidad giro rodillo trabajo caja 1
12	VC2	2 kHz	m/min	Velocidad giro rodillo trabajo caja 2
13	VC3	2 kHz	m/min	Velocidad giro rodillo trabajo caja 3
14	VC4	2 kHz	m/min	Velocidad giro rodillo trabajo caja 4
15	VC5	2 kHz	m/min	Velocidad giro rodillo trabajo caja 5
16	T12	2 kHz	Tm	Tensión cajas 1-2
17	T12	2 kHz	Tm	Tensión cajas 2-3
18	T12	2 kHz	Tm	Tensión cajas 3-4
19	T12	2 kHz	Tm	Tensión cajas 4-5
20	AC1	2 kHz	g	Acelerómetro caja 1
21	AC2	2 kHz	g	Acelerómetro caja 2
22	AC3	2 kHz	g	Acelerómetro caja 3
23	AC4	2 kHz	g	Acelerómetro caja 4
24	AC5	2 kHz	g	Acelerómetro caja 5
25	RXE	2 kHz	e(%)	Rayos X entrada caja 1
26	RX1	2 kHz	e(%)	Rayos X salida caja 1
27	RX2	2 kHz	e(%)	Rayos X salida caja 2
28	RX5A	2 kHz	e(%)	Rayos X salida caja 5 (A)
29	RX5B	2 kHz	e(%)	Rayos X salida caja 5 (B)

N°	Nombre	Muestreo	Unidades	Descripción
30	nAinf1	1 x bob.		Número cilindro apoyo inferior caja 1
31	nAinf2	1 x bob.		Número cilindro apoyo inferior caja 2
32	nAinf3	1 x bob.		Número cilindro apoyo inferior caja 3
33	nAinf4	1 x bob.		Número cilindro apoyo inferior caja 4
34	nAinf5	1 x bob.		Número cilindro apoyo inferior caja 5
35	nAsup1	1 x bob.		Número cilindro apoyo superior caja 1
36	nAsup2	1 x bob.		Número cilindro apoyo superior caja 2
37	nAsup3	1 x bob.		Número cilindro apoyo superior caja 3
38	nAsup4	1 x bob.		Número cilindro apoyo superior caja 4
39	nAsup5	1 x bob.		Número cilindro apoyo superior caja 5
40	nTinf1	1 x bob.		Número cilindro trabajo inferior caja 1
41	nTinf2	1 x bob.		Número cilindro trabajo inferior caja 2
42	nTinf3	1 x bob.		Número cilindro trabajo inferior caja 3
43	nTinf4	1 x bob.		Número cilindro trabajo inferior caja 4
44	nTinf5	1 x bob.		Número cilindro trabajo inferior caja 5
45	nTsup1	1 x bob.		Número cilindro trabajo superior caja 1
46	nTsup2	1 x bob.		Número cilindro trabajo superior caja 2
47	nTsup3	1 x bob.		Número cilindro trabajo superior caja 3
48	nTsup4	1 x bob.		Número cilindro trabajo superior caja 4
49	nTsup5	1 x bob.		Número cilindro trabajo superior caja 5
50	dAinf1	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro apoyo inferior caja 1
51	dAinf2	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro apoyo inferior caja 2
52	dAinf3	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro apoyo inferior caja 3
53	dAinf4	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro apoyo inferior caja 4
54	dAinf5	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro apoyo inferior caja 5
55	dAsup1	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro apoyo superior caja 1
56	dAsup2	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro apoyo superior caja 2
57	dAsup3	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro apoyo superior caja 3
58	dAsup4	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro apoyo superior caja 4
59	dAsup5	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro apoyo superior caja 5
60	dTinf1	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro trabajo inferior caja 1
61	dTinf2	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro trabajo inferior caja 2
62	dTinf3	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro trabajo inferior caja 3
63	dTinf4	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro trabajo inferior caja 4
64	dTinf5	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro trabajo inferior caja 5
65	dTsup1	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro trabajo superior caja 1
66	dTsup2	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro trabajo superior caja 2
67	dTsup3	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro trabajo superior caja 3
68	dTsup4	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro trabajo superior caja 4
69	dTsup5	1 x bob.	mm	Diámetro cilindro trabajo superior caja 5

Nº	Nombre	Muestreo	Unidades	Descripción
70	EspE	1 x bob.	μm	Espesor de entrada
71	Esp12	1 x bob.	μm	Espesor caja 1-2
72	Esp23	1 x bob.	μm	Espesor caja 2-3
73	Esp34	1 x bob.	μm	Espesor caja 3-4
74	Esp45	1 x bob.	μm	Espesor caja 4-5
75	EspS	1 x bob.	μm	Espesor de salida
76	Bob	1 x bob.		Id. bobina
77	Ancho	1 x bob.	mm	Espesor de salida
78	Fecha	1 x bob.		Fecha laminación
79	Hora	1 x bob.		Hora laminación
80	Mat	1 x bob.		Tipo de material laminado
81	CalC_03	1 x bob.		Porcentaje de bob. dentro tolerancia
82	LAsup1	1 Hz	Km	Long. lam. cil. apoyo superior caja 1
83	LAsup2	1 Hz	Km	Long. lam. cil. apoyo superior caja 2
84	LAsup3	1 Hz	Km	Long. lam. cil. apoyo superior caja 3
85	LAsup4	1 Hz	Km	Long. lam. cil. apoyo superior caja 4
86	LAsup5	1 Hz	Km	Long. lam. cil. apoyo superior caja 5
87	LAinf1	1 Hz	Km	Long. lam. cil. apoyo inferior caja 1
88	LAinf2	1 Hz	Km	Long. lam. cil. apoyo inferior caja 2
89	LAinf3	1 Hz	Km	Long. lam. cil. apoyo inferior caja 3
90	LAinf4	1 Hz	Km	Long. lam. cil. apoyo inferior caja 4
91	LAinf5	1 Hz	Km	Long. lam. cil. apoyo inferior caja 5
92	LTrab1	1 Hz	Km	Long. lam. cil. trabajo caja 1
93	LTrab2	1 Hz	Km	Long. lam. cil. trabajo caja 2
94	LTrab3	1 Hz	Km	Long. lam. cil. trabajo caja 3
95	LTrab4	1 Hz	Km	Long. lam. cil. trabajo caja 4
96	LTrab5	1 Hz	Km	Long. lam. cil. trabajo caja 5
97	Slip_1	1 Hz	%	Deslizamiento caja 1
98	Slip_2	1 Hz	%	Deslizamiento caja 2
99	Slip_3	1 Hz	%	Deslizamiento caja 3
100	Slip_4	1 Hz	%	Deslizamiento caja 4
101	Slip_5	1 Hz	%	Deslizamiento caja 5
102	Bend_1	1 Hz	Tm	Bending caja 1
103	Bend_2	1 Hz	Tm	Bending caja 2
104	Bend_3	1 Hz	Tm	Bending caja 3
105	Bend_4	1 Hz	Tm	Bending caja 4
106	Bend_5	1 Hz	Tm	Bending caja 5
107	ConAD	1 Hz	%	Concentración emulsión aplicación directa
108	TaAD	1 Hz	°C	Temp. emulsión
109	TaAgua	1 Hz	°C	Temp. agua refriger.

N°	Nombre	Muestreo	Unidades	Descripción
110	TaBanda	1 Hz	°C	Temp. banda entrada
111	Ta34	1 Hz	°C	Temp. banda cajas 3-4
112	Ta45	1 Hz	°C	Temp. banda cajas 4-5
113	RefC_1	1 Hz	%	Abertura válv. refrig. centro caja 1
114	RefC_2	1 Hz	%	Abertura válv. refrig. centro caja 2
115	RefC_3	1 Hz	%	Abertura válv. refrig. centro caja 3
116	RefC_4	1 Hz	%	Abertura válv. refrig. centro caja 4
117	RefC_5	1 Hz	%	Abertura válv. refrig. centro caja 5
118	RefI_1	1 Hz	%	Abertura válv. refrig. intermedia caja 1
119	RefI_2	1 Hz	%	Abertura válv. refrig. intermedia caja 2
120	RefI_3	1 Hz	%	Abertura válv. refrig. intermedia caja 3
121	RefI_4	1 Hz	%	Abertura válv. refrig. intermedia caja 4
122	RefI_5	1 Hz	%	Abertura válv. refrig. intermedia caja 5
122	C_03	1 Hz	%	Porcentaje bobina dentro tolerancia

Bibliografía

- [1] *Agenda Estratégica de Investigación*. Plataforma Tecnológica Española del Acero. Platea, 2006.
- [2] Groothuizen et al. Chatter detection in a five-stand cold mill. *Revue de Metallurgie*, 89(6):571–577, 1992.
- [3] T. Arimura, M. Kamata y M. Saito. An analysis of dynamic behavior of tandem cold mills. *Automatica*, 6(4):601, 1970.
- [4] Y. Benhafsí, T. W. D. Farley y D. S. Wright. An approach to on-line monitoring of fifth octave mill chatter to prolong back-up roll life. En *Proceedings of IOM conference on advances in on-line instrumentation for finishing processes in strip production*. London, 1999.
- [5] C. M. Bishop. *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford University Press, 1995.
- [6] D. R. Bland y H. Ford. The calculation of roll force and torque in cold strip rolling with tensions. *Proceedings of the institution of Mechanical Engineers*, 159:144–153, 1948.
- [7] G.F. Bryant. *Automation of tandem mills*. Iron and Steel Institute, 1973.
- [8] R. B.Sims. Calculation of roll force and torque in cold rolling by graphical and experimental methods. En *Research on the Rolling of Strip*. BISRA, London, 1959.
- [9] P. Chapman, J. Clinton, J. H. Hejlesen, R. Kerber, T. Khabaza y R. Wirth. The current crisp-dm process model for data mining. En *EC Project CRISP-DM*. 1998.
- [10] L. Chefneux, J. P. Fischbach y J. Gouzou. Study and industrial control of chatter in cold-rolling. *Iron and Steel Engineer*, 61(11):17–26, 1984.

- [11] Y. Chen, S. Liu, T. Shi, S. Yang y G. Liao. Stability analysis of the rolling process and regenerative chatter on 2030 tandem mills. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science*, 216(12):1225–1235, 2002.
- [12] M. Cook y R. J. Parker. The computation of loads in metal strip rolling by methods involving the use of dimensional analysis. *Journal of the Institute of Metals*, 82:129–140, 1953.
- [13] P. Cosse y M. Economopoulos. Mathematical study of cold rolling. *C.N.R.M.*, (17):15–32, 1968.
- [14] S. Critchley y D. Paton. Tandem mill vibration. En *4th International Steel Rolling Conference, The science and technology of flat rolling*, tomo 2. Deauville, France, 1987.
- [15] A. A. Cuadrado, I. Díaz, A. B. Díez, F. Obeso y J. A. Gonzalez. Visual data mining and monitoring in steel processes. En *Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the*, tomo 1, páginas 493–500 vol.1. 2002.
- [16] Abel Cuadrado. *Supervisión de procesos complejos mediante técnicas de data minning con incorporación de conocimiento previo*. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, 2002.
- [17] Sergio Rodríguez Cuesta. *Optimización de recursos energéticos y materias primas en procesos industriales mediante técnicas avanzadas de tratamiento de información y visualización del conocimiento*. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, 2008.
- [18] M. H. Cyril y A. G. Piersol. *Harri's shock and vibration handbook*. McGraw-Hill, New York, quinta edición, 2002.
- [19] I. Díaz. *Detección e identificación de fallos en procesos industriales mediante técnicas de procesamiento digital de señal y redes neuronales. Aplicación al mantenimiento predictivo de accionamientos eléctricos*. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, 2000.
- [20] I. Díaz, A. Cuadrado y A. Díez. Correlation visualization of high dimensional data using topographic maps. En *Artificial Neural Networks - ICANN 2002*, tomo 2415, páginas 1005–1010. 2002.
- [21] I. Díaz, A. Cuadrado, A. Díez y G. Ojea. Modelado visual de procesos industriales. *Revista iberoamericana de automática e informática industrial (RIAI)*, 2(4):11, 2005.

- [22] G. Deboeck y T. Kohonen. *Visual explorations in finance with self-organizing maps*. Springer, London, 1998.
- [23] I. Diaz, A. A. Cuadrado, A. Diez, M. Dominguez, J. J. Fuertes y M. A. Prada. Visualization of changes in process dynamics using self-organizing maps. En *Proceedings of the 20th international conference on Artificial neural networks: Part II*, páginas 343–352. Springer-Verlag, Thessaloniki, Greece, 2010.
- [24] I. Diaz, M. Dominguez, A. A. Cuadrado y J. J. Fuertes. A new approach to exploratory analysis of system dynamics using som. applications to industrial processes. *Expert Systems with Applications*, 34(4):2953–2965, 2008.
- [25] I. Diaz y J. Hollmen. Residual generation and visualization for understanding novel process conditions. En *Neural Networks, 2002. IJCNN '02. Proceedings of the 2002 International Joint Conference on*, tomo 3, páginas 2070–2075. 2002.
- [26] L. B. Donkle III. Fifth-octave chatter problem solved using vibration analysis. *AISE Steel Technology*, (November), 1999.
- [27] R. O. Duda y P. E. Hart. *Pattern classification and scene classification*. Wiley Interscience, New York, 1973.
- [28] S. Ekelund. The analysis of factors influencing rolling pressure and power consumption in the hot rolling of steel. *Steel 93*, páginas 8–14, 1933.
- [29] ENSIDESA. *Características técnicas de las instalaciones de laminación*. Avilés, 1978.
- [30] T. W. D. Farley, S. Rogers y D. Nardini. Understanding mill vibration phenomena. En *IOM3 Conference: Vibration in Rolling Mills*. London, U. K., 2006.
- [31] Tom Farley. Cold-rolling mill vibration and its impact on productivity and product quality. En *Flat-Rolled Steel Processes*, páginas 255–263. CRC Press, 2009.
- [32] M. C. Ferreira de Oliveira y H. Levkowitz. From visual data exploration to visual data mining: a survey. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, 9(3):378–394, 2003.

- [33] H. Ford, W. C. F. Hessenberg, C. L. Smith, D. V. Wilson, H. Oneill, R. B. Sims, M. F. Dowding, D. R. Bland, N. H. Polakowski, B. B. Hundy, A. Allison y F. H. Scott. Cold rolling with strip tension part 1- a new approximate method of calculation and a comparison with other methods. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 172(1):28–40, 1952.
- [34] K. Furukawa, I. Yarita, Y. Seino, T. Takimoto, Y. Nakazato, K. Nakagawa y I. Furunaga. *Kawasaki Steel Giho*, 8(60), 1976.
- [35] Francisco J. García, Ignacio Díaz, Ignacio Álvarez, Daniel Pérez, Daniel G. Ordóñez y Manuel Domínguez. Time-frequency analysis of hot rolling using manifold learning. En *Engineering Applications of Neural Networks*, tomo 363 de *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, páginas 150–155. Springer, 2011.
- [36] A. Gersho. On the structure of vector quantizers. *IEEE Trans. Inform. Theory*, IT-25:373–380, 1979.
- [37] V.B. Ginzburg. *Flat-rolled steel processes: advanced technologies*. CRC, 2009.
- [38] R. M. Gray. Vector quantization. *IEEE ASSP Mag.*, 1(2):4–29, 1984.
- [39] V. G. Grishin, A. S. Sula y M. Ulieru. Pictorial analysis: a multi-resolution data visualization approach for monitoring and diagnosis of complex systems. *Information Sciences*, 152:1–24, 2003.
- [40] R. M. Guo, A. C. Urso y J. H. Schunk. Analysis of chatter vibration phenomena of rolling mills using finite element methods. *Iron and Steel Engineer*, 70(1):29–39, 1993.
- [41] B. Hardwick, A. Tordi y T. W. D. Farley. Identification and solution of fifth octave mode mill chatter problems. En *IOM3 Conference: Vibration in rolling mills*. London, U.K., 2006.
- [42] Q.P. He, S.J. Qin y J. Wang. A new fault diagnosis method using fault directions in fisher discriminant analysis. *AIChE journal*, 51(2):555–571, 2005.
- [43] S.-g. He, G. A. Wang y L. Li. Data mining and knowledge discovery in real life applications. *IN-TECH*, 2009.
- [44] W. C. F. Hessenberg. Principles of continuous gauge control in sheet and strip rolling. *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 166:75–81, 1952.

- [45] W. C. F. Hessenberg y W. N. Jenkins. Effect of screw and speed-setting changes on gauge, speed and tension in tandem mills. *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 169:1051–1058, 1955.
- [46] W. C. F. Hessenberg y R. B. Sims. The effect of tension on torque and roll force in cold strip rolling. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 168(2):155–164, 1951.
- [47] R. Hill. *The mathematical theory of plasticity*, tomo 11. Oxford University Press, USA, 1950.
- [48] J. H. Hitchcock. Roll neck bearings. *ASME Research Publication*, 1935.
- [49] I. Hoshino, Y. Maekawa, T. Fujimoto, H. Kimura y H. Kimura. Observer-based multivariable control of the aluminum cold tandem mill. *Automatica*, 24(6):741–754, 1988.
- [50] P. H. Hu y K. F. Ehmann. A dynamic model of the rolling process. part i: homogeneous model. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(1):1–19, 2000.
- [51] R. Isermann y P. Ballé. Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes. *Control Engineering Practice*, 5(5):709–719, 1997.
- [52] D. Jortner, J. F. Osterle y C. F. Zorowski. An analysis of the mechanical of cold strip rolling. *Iron and Steel Engineer year book*, páginas 403–411, 1959.
- [53] D. A. Keim. Information visualization and visual data mining. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, 8(1):1–8, 2002.
- [54] Y. Kimura, Y. Sodani, N. Nishimura, N. Ikeuchi y Y. Mihara. Analysis of chatter in tandem cold rolling mills. *ISIJ International*, 43(1):77–84, 2003.
- [55] D. Kobasa y R. A. Schultz. Experimental determination of the length of the arc of contact in cold rolling. *Iron and Steel Engineer year book*, páginas 283–288, 1968.
- [56] T. Kohonen. The self-organizing map. *Proceedings of the IEEE*, 78(9):1464–1480, 1990.
- [57] T. Kohonen. *Self Organizing Maps*. Springer, 1995.

- [58] T. Kohonen, E. Oja, O. Simula, A. Visa y J. Kangas. Engineering applications of the self organizing map. *Proceedings of the IEEE*, 84(10):1358–1381, 1996.
- [59] T. Kourti y J.F. MacGregor. Process analysis, monitoring and diagnosis, using multivariate projection methods. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 28(1):3–21, 1995.
- [60] M. Kreuseler y H. Schumann. A flexible approach for visual data mining. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, 8(1):39–51, 2002.
- [61] G. Lianis y H. Ford. A graphical solution of the cold rolling problem when tensions are applied to the strips. En *Research on the Rolling of Strip*. BISRA, London, 1959.
- [62] L. Ljung. *System identification: theory for the user*. Prentice Hall, 1987.
- [63] D. McFarlane y K. Glover. A loop shaping design procedure using h-infinity-synthesis. *Ieee Transactions on Automatic Control*, 37(6):759–769, 1992.
- [64] Paul A. Meehan. Vibration instability in rolling mills: Modeling and experimental results. *Journal of Vibration and Acoustics*, 124(2):221–228, 2002.
- [65] P. Miller, R. E. Swanson y C. E. Heckler. Contribution plots: a missing link in multivariate quality control. *Applied Mathematics and Computer Science*, 8(4):17, 1998.
- [66] Y. Misaka. Control equations for cold tandem mills. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, 8(2):86, 1968.
- [67] R. H. Moller y J. S. Hoggart. Periodic surface finish and torque effects during cold strip rolling. *Journal of the Australian Institute of Metals*, 12(2):155–165, 1967.
- [68] J. M. Moore y J. Peters. Rolling mill vibrations measurement by modal analysis. En *Conference on dimensional control in rolling mills*. London, 1990.
- [69] A. Morán, S. Alonso, M. A. Prada, R. García y J. J. Fuertes. Time series for fault detection in an industrial pilot plant. En *Physcon 2011*,

5th International Scientific Conference on Physics and Control. León, 2011.

- [70] A. Nadai. *Plasticity*. McGraw-Hill, New York London, 1931.
- [71] A. Nadai. The forces required for rolling steel strip under tension. *Journal of applied mechanics, American society of mechanical engineers*, página 8, 1939.
- [72] D. G. Ordoñez, A. A. Cuadrado, F. J. García, A. B. Díez y J. J. Fuertes. Visual analysis of residuals from data-based models in complex industrial processes. En *Physcon 2011, 5th International Scientific Conference on Physics and Control*. Leon, 2011.
- [73] E Orowan. The calculation of roll pressure in hot and cold flat rolling. *Proceedings of the institution of Mechanicals Engineers*, 150:140–167, 1943.
- [74] D. L. Paton y S. Critchley. Tandem mill vibration: Its cause and control. En *Mechanical Working; Steel Processing XXII, Proceedings of the 26th Mechanical Working; Steel Processing Conference.*, páginas 247–255. Iron and Steel Soc Inc, Chicago, IL, USA, 1985.
- [75] O. Pawelski, W. Rasp y K. Friedewald. Chattering in cold rolling-theory of interaction of plastic and elastic deformation. En *4th Int. Steel Rolling conference, the Science and Technology of Flat Rolling*. Deauville, France, 1987.
- [76] Daniel Peña. *Análisis de datos multivariantes*. McGraw-Hill, 2002.
- [77] B. Petit, D. Decrey, A. Jakubowski, F. Bertolini, J. Perret y S. Gouttebroze. Global approach of 3rd octave chatter vibrations at arcelor mardyck cold rolling mill and analysis of technological interactions. *La Revue Metallurgie*, Julio 2005.
- [78] B. Petit, P. D. Thong, P. Lorong y G. Coffignal. Modal analysis and vibratory modelling for an industrial cold rolling mill stand. *Revue De Metallurgie-Cahiers D Informations Techniques*, 97(7-8):941–951, 2000.
- [79] J. Pittner y M. A. Simaan. *Tandem Cold Metal Rolling Mill Control*. Using Practical Advanced Methods. Springer, London, primera edición, 2011.

- [80] J. Polzer, M. Markworth, M. Jelali, J. L. Rendueles, F. Sanfilippo, M. Lupinelli, L. Onofri, J. Busch, P. Michels, A. Diez y A. Cuadrado. *Intelligent soft-sensor technology and automatic model-based diagnosis for improved quality, control and maintenance of mill production lines (Softdetect)*. Research Fund for Coal and Steel series-Industrial research and development. Office for official publications of the European communities, Luxembourg, 2009.
- [81] L. Prandtl. Zeitschrift für angewandte mathematik und mechanik. 3:401, 1923.
- [82] J. C. Principe, L. D. Wang y M. A. Motter. Local dynamic modeling with self-organizing maps and applications to nonlinear system identification and control. *Proceedings of the IEEE*, 86(11):2240–2258, 1998.
- [83] S. J. Qin. Statistical process monitoring: Basics and beyond. *J. Chemom*, 17(480), 2003.
- [84] S. S. Rao y A. Kumar. Finite-element analysis of cold strip rolling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 17(3):159–168, 1977.
- [85] W. L. Roberts. A simplified cold rolling model. *Iron and Steel Engineer year book*, 1965.
- [86] W. L. Roberts. Computing the coefficient of friction in the roll bite from mill data. *Blast Furnace and Steel Plant*, 55:499–508, 1967.
- [87] William L. Roberts. *Cold rolling of steel*. Marcel Dekker, Inc., New York, 1978.
- [88] T. Suga, K. Kurata, A. Date, A. Ishihara y K. Ishinaga. En *Spring Conf. for the Technol. Plast.*. Jpn. Soc. Technol. Plast., Tokyo, 1981.
- [89] T. Tamiya, K. Furui y H. Iida. Analysis of chattering phenomenon in cold rolling. *Proceedings of the Mineral Waste Utilization Symposium*, 2:1191–1202, 1980.
- [90] J. Thusty, G. Chandra, S. Critchley y D. Paton. Chatter in cold rolling. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 31(1):195–199, 1982.
- [91] W. Trinks. Pressure and roll flattening in cold rolling. *Blast Furnace and Steel Plant*, 25:19, 1937.

- [92] A. I. Tselikov. Effect of external friction and tension on the pressure of the metal on the rolls in rolling. *Metallurg*, 6:15, 1939.
- [93] A. Ultsch y H. P. Siemon. Kohonen's self organizing feature maps for exploratory data analysis. En *In Proc. INNC'90, Int. Neural Network Conf.*, páginas 305–308. Dordrecht, Netherlands, 1990.
- [94] L. R. Underwood. Rolling mills, methods of roll load and power calculation. *Metal Ind.*, (Feb. 27 March 5 March 19):166–169 187–190 231–234, 1948.
- [95] Leslie Reneson Underwood. *The rolling of metals; theory and experiment*. Chapman and Hall, London, 1950.
- [96] UNESID. *El proceso Siderúrgico*. La siderurgia española. Madrid, 1987.
- [97] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, Y. Kewen y S. N. Kavuri. A review of process fault detection and diagnosis part i: Quantitative model based methods. *Computers & Chemical Engineering*, 27(3):293–311, 2003.
- [98] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, Y. Kewen y S. N. Kavuri. A review of process fault detection and diagnosis part ii: Quantitative model and search strategies. *Computers & Chemical Engineering*, 27(3):313–326, 2003.
- [99] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, Y. Kewen y S. N. Kavuri. A review of process fault detection and diagnosis:: Part iii: Process history based methods. *Computers & Chemical Engineering*, 27(3):327–346, 2003.
- [100] J. Vesanto. Using the som and local models in time-series prediction. En *Workshop self-organizing maps (WSOM)*, páginas 209–214. Helsinki University of Technology, Finland, 1997.
- [101] José L. Rendueles Vigil. *Optimización de procesos industriales complejos mediante técnicas de visualización multidimensional. Aplicación a un tren de laminación en frío*. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, 2003.
- [102] T. Villmann, R. Der, M. Herrmann y T. M. Martinetz. Topology preservation in self-organizing feature maps: exact definition and measurement. *Neural Networks, IEEE Transactions on*, 8(2):256–266, 1997.

- [103] T. Von Karman. An article on the theory of rolling process. *Zeitschrift Fur Angewandte Mathematik Und Mechanik*, 5:139–141, 1925.
- [104] H Watanabe y N Takahashi. Control equations for dynamic characteristics of cold rolling tandem mills. *Iron and Steel Engineer*, páginas 59–64, 1974.
- [105] Xu Yang, Chao-nan Tong, Guang-feng Yue y Jian-ji Meng. Coupling dynamic model of chatter for cold rolling. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 17(12):30–34, 2010.
- [106] I. Yarita, K. Furukawa, Y. Seino, T. Takimoto, Y. Nakazato y K. Nakagawa. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, 18(1), 1972.
- [107] I. Yarita, K. Furukawa, Y. Seino, T. Takimoto, Y. Nakazato y K. Nakagawa. Analysis of chattering in cold rolling for ultrathin gauge steel strip. 18:1–10, 1978.
- [108] S. Yoon y J.F. MacGregor. Fault diagnosis with multivariate statistical models part i: using steady state fault signatures. *Journal of process control*, 11(4):387–400, 2001.
- [109] I. S. Yun. *Chatter in Cold Rolling*. Tesis Doctoral, 1995.
- [110] I. S. Yun, K. F. Ehmann y W. R. D. Wilson. Chatter in the strip rolling process, part 2: Dynamic rolling experiments. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 120(2):337–342, 1998.
- [111] I. S. Yun, K. F. Ehmann y W. R. D. Wilson. Chatter in the strip rolling process, part 3: Chatter model. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 120(2):343–348, 1998.
- [112] I. S. Yun, W. R. D. Wilson y K. F. Ehmann. Chatter in the strip rolling process, part 1: Dynamic model of rolling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 120(2):330–336, 1998.
- [113] I. S. Yun, W. R. D. Wilson y K. F. Ehmann. Review of chatter studies in cold rolling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 38(12):1499–1530, 1998.

- [114] Jue Zhong, Hongzhi Yan, Jian Duan, Lejiang Xu, Wenhai Wang y Peilin Chen. Industrial experiments and findings on temper rolling chatter. *Journal of Materials Processing Technology*, 120(1-3):275–280, 2002.