



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Programa de Doctorado: Sistemas y Servicios Informáticos para
Internet

Tesis doctoral

**CLASIFICACIÓN DE DEFECTOS PERIÓDICOS
EN SISTEMAS DE INSPECCIÓN
BASADOS EN VISIÓN POR COMPUTADOR**

Francisco González Bulnes



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Programa de Doctorado: Sistemas y Servicios Informáticos para
Internet

Tesis doctoral

**CLASIFICACIÓN DE DEFECTOS PERIÓDICOS
EN SISTEMAS DE INSPECCIÓN
BASADOS EN VISIÓN POR COMPUTADOR**

presentada por

Francisco González Bulnes

para la obtención del grado de

Doctor por la Universidad de Oviedo

dirigida por **Daniel Fernando García Martínez**

y **Rubén Usamentiaga Fernández**

*Para el científico investigador es un buen ejercicio matinal
descartar su hipótesis favorita cada día antes del desayuno.*

Esto le mantiene joven.

Konrad Lorenz.

Agradecimientos

Desde que, allá por el año 2007, me matriculé en el programa de doctorado, muchas personas me han ayudado, en mayor o menor medida, a llegar a donde estoy ahora. Ángel, uno de mis profesores de matemáticas del colegio decía, como varios años más tarde diría también el agente Smith en *Matrix*, que todo lo que tiene un principio tiene un final. Y tenía razón. Lo que en 2007 (y años posteriores) parecía que no iba a terminar nunca, finalmente terminó. Y ya con la tesis terminada, me gustaría dar las gracias a todas las personas que han contribuido a que mi tesis haya llegado a buen puerto.

Las dos primeras posiciones de mi lista (con esto no me refiero a la primera y a la segunda, sino a dos posiciones n^o1) son, como no podía ser de otra forma, para mis directores, Daniel y Rubén, que han dedicado una gran cantidad de horas en dirigir mi trabajo, dar consejos, ideas y orientaciones, revisar todo cuanto escribía en tiempo record y estar siempre disponibles para que mi investigación avanzara. Sin su ayuda este documento en vez de una tesis doctoral sería un proyecto fin de carrera (y no de los buenos).

En siguiente lugar, y no por ello menos importante, me gustaría dar gracias a mi familia, especialmente a mis padres. A mi madre, porque desde que era pequeño siempre trató de inculcarme un hábito de estudio, con el fin de que mi trayectoria académica llegara lo más lejos posible (supongo que estará satisfecha, a más de doctor ya no puedo llegar). A mi padre, porque aunque hace ya muchos años que no se encuentra con nosotros y no haya tenido tiempo de darme grandes consejos, siempre me ha servido como ejemplo de a donde quiero llegar. Como no, también quiero dar las gracias a mis hermanos, Patricia y Luis, por su apoyo.

También me gustaría reservar un par de líneas para mis compañeros del área de Arquitectura y Tecnología de Computadores, siempre dispuestos a solucionar cualquier duda que me pudiera surgir. En especial me gustaría dar las gracias a Julio, quien me inició en el mundo investigador dirigiendo mi proyecto final de carrera, y a Javier y Juan Carlos, compañeros de asignatura en mis primeros años como docente. Tampoco me voy a olvidar de Brugos, que desde el principio siempre me insistió mucho en la importancia de hacer una buena tesis y de no perder nunca las ganas de seguir trabajando.

Tanto mérito o más tienen el resto de personas que me aguantan día a día. Gracias a Pelayo y Miguel, compañeros de trabajo en la Universidad, que hacen el paso de los días mucho más llevadero. Gracias a mi querido *Renault 9*, que todos los días me trae a trabajar a pesar de su avanzada edad, y gracias a

Víctor, Jonathan, MC, Lucía, Dani Cuetos y Dani Álvarez, que me ayudan a desconectar fuera de las horas de trabajo, y gracias a Martita que, además de contar con su compañía dentro y fuera de la Universidad, me proporciona toda la energía que mi cerebro necesita en forma de deliciosa repostería.

Pero no sólo son importantes las personas que me han ayudado durante estos últimos años, sino todas las que de un modo u otro han ayudado, a lo largo de mi vida, a que finalmente llegara hasta aquí. Éstos son todos mis antiguos profesores del colegio, instituto (especialmente a Rafa, el mejor profesor que nunca tuve) y Universidad y mis antiguos compañeros de estudios: Lolo, Cristóbal, Nachete, Rober, David y un largo etcétera, ya que entre todos han conseguido que me sintiera a gusto en la Universidad y que acabara prefiriendo quedarme aquí a buscarme la vida fuera.

Resumen

Esta tesis se centra en la detección de defectos generados de forma periódica durante la producción de materiales continuos (como plástico, papel o metales laminados). Puesto que el número de defectos que aparezcan en las superficies de este tipo de productos es un indicador de su calidad, reducir su número es un aspecto de vital importancia. La detección y reparación del elemento que está generando los defectos superficiales de forma periódica puede reducir considerablemente el número de defectos superficiales generados. De este modo, aumentará la calidad de los productos fabricados. El objetivo planteado en esta tesis es desarrollar una técnica capaz de detectar este tipo de defectos con la mayor rapidez posible y valorar la calidad de dichas detecciones. Aunque dicha técnica debe ser genérica para que pueda aplicarse a múltiples problemas, en esta tesis se han utilizado bandas de acero para su desarrollo y evaluación.

Para elaborar un sistema capaz de detectar este tipo de defectos es necesario realizar tres tareas: la detección de todos los defectos superficiales existentes, obtener las características de cada uno de ellos y determinar cuáles han sido generados de forma periódica. Existen varias técnicas encargadas de realizar las dos primeras tareas, pero no para la última. La literatura científica disponible en la actualidad sobre esta tarea es muy escasa. Aunque existen varios sistemas comerciales que la realizan, no especifican como lo hacen. Por ello, el trabajo realizado en esta tesis sobre la detección de defectos generados de forma periódica puede servir de base para posteriores investigaciones en este campo.

La solución propuesta para detectar los defectos periódicos se basa en un algoritmo de *backtracking* que comprueba si ciertas características de un conjunto de defectos cumple una serie de condiciones. Para ello, toda la información relativa a posición, dimensiones y características de los defectos debe estar disponible de tal modo que pueda ser accedida rápidamente y sin ocupar mucho espacio. Finalmente, se han utilizado matrices dispersas, al ser la estructura de datos más adecuada para cumplir con estos dos requisitos.

Para poder determinar si las detecciones llevadas a cabo son buenas, es necesario cuantificarlas. Para realizar dicha cuantificación se han utilizado métricas basadas en discrepancias, es decir, se han contabilizado las diferencias entre los defectos periódicos detectados y los defectos periódicos que la banda tiene realmente. Se proponen distintos modos de realizar estas contabilizaciones, así como el modo en que son combinadas para obtener el valor de una métrica. Para poder utilizarlas, es necesario contar con una clasificación perfecta (también llamada

ground truth) de cada banda. Puesto que realizar esta tarea manualmente (incluso por un operador experimentado) es muy engorroso y fácilmente se cometen errores, se ha desarrollado una herramienta que permite realizar dicha tarea de forma sencilla.

Como el algoritmo diseñado puede ser parametrizado para modificar el modo en que detecta los defectos, es necesario determinar el conjunto de parámetros que proporciona mejores resultados de forma global. Como dicha búsqueda requiere un elevado consumo de recursos computacionales, se han utilizado tecnologías *grid* para reducir el tiempo de búsqueda lo suficiente como para poder realizar la experimentación en pocos días.

Finalmente, los resultados proporcionados por la técnica desarrollada una vez configurada de forma óptima fueron valorados y comparados con los obtenidos por una herramienta comercial ampliamente utilizada para detectar defectos periódicos. Para ello fue utilizado un conjunto de bandas de acero laminadas en la factoría de Arcelor-Mittal en Avilés. Los resultados obtenidos muestran una mejora sustancial respecto a la herramienta comercial, lo que permite concluir que la técnica desarrollada cumple con los objetivos propuestos inicialmente y que puede ser utilizada para realizar la detección de defectos periódicos en entornos industriales.

Abstract

This thesis focuses on the detection of defects generated periodically during the production of web materials (like plastic, paper or sheet metal). Since the number of defects that appear on the surfaces of these products is an indicator of its quality, the reduction the number of defects is a critical aspect. The detection and repair of the element that is generating surface defects periodically, could greatly reduce the total number of surface defects. Thus, product quality will be increased. The stated goal of this thesis is to develop a technique capable of detecting such defects as quickly as possible and to assess the quality of such detections. Although the proposed technique is generic enough to be applicable to several problems, in this thesis steel strips were used for its development and evaluation.

To develop a system capable to detect such defects it is necessary to perform three tasks: detect all surface defects, obtain the characteristics of them and determine which ones were generated periodically. Several techniques already exist to perform the first two tasks, but not for the last one. Scientific literature currently available about this task is limited. Although there are several commercial systems that detect periodical defects, they do not specify how this task is performed. Therefore, the work done in this thesis about the detection of periodical defects can provide a basis for further research in this field.

The proposed solution to detect periodical defects is a backtracking-based algorithm that checks whether certain characteristics of a set of defects meet certain conditions. To do this, all information relating to position, size and characteristics of each defect must be available to be accessed quickly and using a small amount of memory. Finally, sparse matrices have been used, being the most appropriate data structure to meet these two requirements.

To determine whether the detections are good, it is necessary to quantify them. To obtain this quantification, discrepancy based metrics have been used. This kind of metric accounts the differences between the periodical defects detected and the periodical defects that the strip actually has. Different ways to make these accounts are proposed, and how they are combined to obtain the value of the metric. To use them, it is necessary to have a perfect detection (also called ground truth) for each strip. Since performing this task manually (even by an experienced operator) is very difficult, a tool to easily perform this task has been developed.

Since the algorithm designed can be parameterized to change the way that

periodical defects are detected, is essential to determine the parameter configuration that provides better results. This determination is developed by a full search that requires a high consumption of computational resources. For this reason, grid technologies have been used to reduce the search time enough to determine the optimal configuration in a few days.

Finally, the results provided by the technique developed (optimally set) were assessed and compared with those obtained by a commercial tool widely used to detect periodical defects. To perform this task, a set of steel strips rolled in the factory Arcelor-Mittal Avilés was used. The results show a substantial improvement over the commercial tool, which allows us to conclude that the proposed technique meets the initial objectives and can be used for periodical defect detection in industrial environments.

Índice general

| | |
|---|-----------|
| Índice de figuras | xiii |
| Índice de tablas | xv |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Objetivos | 1 |
| 1.2. Organización de la tesis | 3 |
| 2. Contexto Industrial | 7 |
| 2.1. Laminación de acero | 7 |
| 2.2. Definición de defecto periódico | 9 |
| 2.3. Necesidades | 14 |
| 3. La inspección de defectos superficiales | 17 |
| 3.1. Detección de defectos superficiales | 18 |
| 3.1.1. Corriente de Foucault | 18 |
| 3.1.2. Líneas láser | 20 |
| 3.1.3. Ultrasonidos | 21 |
| 3.1.4. Rayos X | 22 |
| 3.1.5. Visión por computador | 22 |
| 3.2. Clasificación de defectos | 26 |
| 3.2.1. Redes neuronales | 27 |
| 3.2.2. Máquinas de vectores de soporte | 27 |
| 3.3. Agrupación de defectos individuales en defectos periódicos | 28 |
| 3.3.1. Corriente de Foucault | 29 |
| 3.3.2. Visión por computador | 30 |
| 3.4. Sistemas Comerciales de inspección | 34 |
| 3.4.1. AMEPA | 34 |
| 3.4.2. Andec Manufacturing | 34 |
| 3.4.3. Cognex SIS | 34 |
| 3.4.4. DSI Plus | 34 |
| 3.4.5. ISRA Vision | 35 |
| 3.4.6. Lismar | 35 |
| 3.4.7. Markttec | 35 |

| | |
|---|------------|
| 3.4.8. Parsytec | 35 |
| 3.4.9. Sarclad | 35 |
| 3.4.10. Struck | 36 |
| 3.5. Conclusiones y motivación | 36 |
| 4. Clasificación Manual | 39 |
| 4.1. Punto de partida | 39 |
| 4.2. Clasificación | 43 |
| 4.3. Herramienta de ayuda a la clasificación manual | 46 |
| 4.3.1. Requisitos | 46 |
| 4.3.2. Prototipo desarrollado | 48 |
| 5. Técnica de detección y caracterización automática | 57 |
| 5.1. Representación de la información en memoria | 58 |
| 5.1.1. Matrices dispersas coordinadas | 60 |
| 5.1.2. Matrices dispersas con índices de filas | 61 |
| 5.1.3. Matrices dispersas híbridas | 63 |
| 5.2. Algoritmo de detección y caracterización | 64 |
| 5.3. Parametrización de la búsqueda | 70 |
| 6. Valoración de la detección y caracterización de defectos periódicos | 77 |
| 6.1. Conceptos Generales | 77 |
| 6.2. Métodos de contabilización de aciertos y fallos | 79 |
| 6.2.1. Contabilización por banda | 81 |
| 6.2.2. Contabilización por defecto periódico | 83 |
| 6.2.3. Contabilización por defecto individual | 91 |
| 6.2.4. Resumen de características de los métodos de contabilización | 99 |
| 6.3. Métricas | 100 |
| 6.3.1. Errores de tipo I y II | 100 |
| 6.3.2. Probabilidad de error | 102 |
| 6.3.3. Recall, Specificity, Accuracy y Precision | 104 |
| 6.3.4. Métrica de Jaccard | 107 |
| 6.3.5. F-Métrica | 107 |
| 6.4. Métricas seleccionadas | 109 |
| 7. Diseño Experimental | 113 |
| 7.1. Pruebas planteadas | 114 |
| 7.2. Grid Computing | 118 |
| 7.2.1. Herramientas grid | 120 |
| 7.2.2. Condor | 123 |
| 7.3. Grid diseñado para la experimentación | 128 |

| | |
|---|------------|
| 8. Resultados | 135 |
| 8.1. Fase de entrenamiento | 135 |
| 8.1.1. Contabilización por defecto periódico binaria (DPB) . . . | 136 |
| 8.1.2. Contabilización por defecto periódico híbrida (DPH) . . . | 147 |
| 8.1.3. Contabilización por defecto periódico real (DPR) | 154 |
| 8.1.4. Contabilización por defecto individual (DI) | 157 |
| 8.1.5. Análisis de resultados del entrenamiento | 163 |
| 8.2. Fase de <i>test</i> | 170 |
| 9. Conclusiones | 181 |
| 9.1. Objetivos alcanzados y aportaciones | 181 |
| 9.2. Difusión de las aportaciones | 183 |
| 9.3. Trabajo futuro | 184 |
| Bibliografía | 187 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| 2.1. Esquema de un tren de laminación de acero | 8 |
| 2.2. Laminación de una banda de acero en el tren acabador | 9 |
| 2.3. Caja de laminación del tren acabador | 10 |
| 2.4. Características de un defecto periódico | 11 |
| 2.5. Ejemplo de densidad alta de defectos individuales | 13 |
| 2.6. Definición de sección y defecto perdido | 14 |
| | |
| 3.1. Sensor de corriente de Foucault | 19 |
| 3.2. Fuerza de Lorentz medida en un alambre con defectos | 19 |
| 3.3. Tipos de iluminación | 23 |
| 3.4. Histograma de una imagen con defecto | 24 |
| 3.5. Detección de defectos | 25 |
| 3.6. Distintos tipos de defectos periódicos en planchas de acero | 30 |
| 3.7. Determinación del periodo de un defecto periódico | 31 |
| 3.8. Cálculo de la periodicidad teórica | 32 |
| | |
| 4.1. Componentes del sistema Parsytec | 41 |
| 4.2. Captura de imágenes con solapamiento | 41 |
| 4.3. Unión de distintas partes de un mismo defecto | 42 |
| 4.4. Datos de los defectos de una banda de acero | 44 |
| 4.5. Representación de los defectos de una banda de acero | 44 |
| 4.6. Rejilla de periodicidad teórica | 45 |
| 4.7. Clasificación manual mediante banda impresa | 45 |
| 4.8. Ventana principal de la herramienta de ayuda a la clasificación manual | 49 |
| 4.9. Manejo de entrada y salida | 49 |
| 4.10. Representación de los defectos individuales de una banda de acero | 51 |
| 4.11. Características de un defecto seleccionado | 52 |
| 4.12. Imagen de un defecto seleccionado | 52 |
| 4.13. Barra de herramientas del prototipo | 52 |
| 4.14. Determinación del periodo real mediante una rejilla ajustable . . | 53 |
| 4.15. Rejilla transversal | 54 |
| 4.16. Mostrar la clasificación realizada por el sistema Parsytec | 54 |

| | |
|--|-----|
| 5.1. Mapa de defectos de una banda de acero | 59 |
| 5.2. Diferencia dimensional entre defectos individuales generados por un mismo cilindro defectuoso | 66 |
| 5.3. Mapa de una banda de acero con su histograma | 68 |
| 5.4. Defecto individual encuadrado automáticamente | 70 |
| 5.5. Imprecisión en la detección de los defectos individuales | 71 |
| 5.6. Área de búsqueda | 72 |
| 6.1. Distintos grados de detección de un defecto periódico | 87 |
| 6.2. Funciones de evaluación de FP y FN | 92 |
| 6.3. Función de valoración de defectos periódicos FN y FP | 110 |
| 7.1. Monitorización de los trabajos en Condor | 123 |
| 7.2. Monitorización de los recursos en Condor | 124 |
| 7.3. Abstracción del funcionamiento de Condor | 124 |
| 7.4. Ejemplos de ClassAds para un trabajo y una recurso de ejecución | 126 |
| 7.5. Estructura del <i>grid</i> | 129 |
| 7.6. Fichero de descripción de una tarea | 132 |
| 8.1. Comparativa utilizando contabilización DPB | 137 |
| 8.2. Resultados obtenidos para el método DPB | 138 |
| 8.3. Análisis de sensibilidad de parámetros morfológicos con DPB | 139 |
| 8.4. Análisis de sensibilidad de <i>MinDefs</i> con DPB | 140 |
| 8.5. Análisis de sensibilidad de <i>MaxSkips</i> con DPB | 142 |
| 8.6. Análisis de sensibilidad de <i>YRatio</i> con DPB | 143 |
| 8.7. Análisis de sensibilidad de <i>TTol</i> con DPB | 144 |
| 8.8. Comportamiento atípico ante variaciones del parámetro TTol | 146 |
| 8.9. Comparativa utilizando contabilización DPH | 148 |
| 8.10. Resultados obtenidos para el método DPH | 149 |
| 8.11. Análisis de sensibilidad de <i>MinDefs</i> con DPH | 150 |
| 8.12. Análisis de sensibilidad de <i>MaxSkips</i> con DPH | 151 |
| 8.13. Análisis de sensibilidad de <i>YRatio</i> con DPH | 153 |
| 8.14. Análisis de sensibilidad de <i>TTol</i> con DPH | 153 |
| 8.15. Comparativa utilizando contabilización DPR | 155 |
| 8.16. Resultados obtenidos para el método DPR | 156 |
| 8.17. Comparativa entre DPH y DPR | 157 |
| 8.18. Comparativa utilizando contabilización DI | 159 |
| 8.19. Resultados obtenidos para el método DI | 160 |
| 8.20. Detecciones de la herramienta de caracterización y de Parsytec | 161 |
| 8.21. Análisis de sensibilidad de <i>MinDefs</i> con DPR y DI | 162 |
| 8.22. Análisis de sensibilidad de <i>TTol</i> con DPR y DI | 163 |
| 8.23. Resultados de la fase de entrenamiento | 164 |

| | |
|---|-----|
| 8.24. Comparativa entre los métodos DPB y DPR | 165 |
| 8.25. Comparativa entre los métodos DI y DPR | 167 |
| 8.26. Comparativa entre valores de $TTol$ | 169 |
| 8.27. Detección del defecto periódico de la banda E-5 | 170 |
| 8.28. Comparación de resultados de la fase de <i>test</i> | 171 |
| 8.29. Resultados de la fase de <i>test</i> | 172 |
| 8.30. Detecciones de la banda T-11 | 173 |
| 8.31. Detecciones de la banda T-16 | 175 |
| 8.32. Detecciones de la banda T-5 | 176 |
| 8.33. Detecciones de la banda T-3 | 177 |
| 8.34. Detecciones de la banda T-7 | 178 |

Índice de tablas

| | |
|---|-----|
| 3.1. Características de los métodos de detección | 37 |
| 5.1. Ejemplo de desarrollo de los cilindros de trabajo | 69 |
| 6.1. Matriz de confusión genérica | 79 |
| 6.2. Matriz de confusión de contabilización por banda | 81 |
| 6.3. Matriz de confusión de contabilización por defecto periódico | 84 |
| 6.4. Situaciones de detección en la contabilización por defecto periódico | 85 |
| 6.5. Matriz de confusión de contabilización por defecto individual (en cilindros) | 94 |
| 6.6. Situaciones de detección en la contabilización por defecto individual (en cilindros) | 96 |
| 6.7. Matriz de confusión de contabilización por defecto individual (en defectos periódicos) | 96 |
| 6.8. Matriz de confusión de contabilización por defecto individual (según naturaleza) | 98 |
| 6.9. Situaciones de detección en la contabilización por defecto individual (según naturaleza) | 99 |
| 6.10. Características de los métodos de contabilización | 100 |
| 7.1. Bandas seleccionadas para el entrenamiento | 116 |
| 7.2. Valores límite de los parámetros en la experimentación | 117 |
| 7.3. Bandas seleccionadas para el <i>testing</i> | 119 |
| 7.4. Comparación de las características de <i>middleware</i> | 122 |
| 7.5. Computadores utilizados para la experimentación | 128 |
| 8.1. Configuración de parámetros óptima para DPB | 136 |
| 8.2. Configuración de parámetros óptima para DPH | 147 |
| 8.3. Configuración de parámetros óptima para DPR | 154 |
| 8.4. Configuración de parámetros óptima para DI | 158 |
| 8.5. Configuración de parámetros definitiva | 168 |
| 8.6. Resultados obtenidos de la fase de <i>test</i> | 180 |

Capítulo 1

Introducción

Las bandas de acero producidas en las plantas siderúrgicas, son utilizadas como materia prima para muchas otras industrias, por lo que el control de su calidad es esencial. El abanico de productos que requieren acero para su producción es muy amplio, desde latas de refresco hasta automóviles. En todos los casos, la calidad del acero repercute directamente en la calidad del producto final, por lo que el estado de éste es fundamental. Una parte muy importante del proceso de supervisión de la calidad del acero se realiza en el tren acabador de la planta, lugar donde el acero caliente es laminado hasta obtener su definitiva forma de plancha delgada que posteriormente es bobinada para su distribución. Si los cilindros que ejercen presión sobre el acero presentan algún tipo de deformación en su superficie, dejarán una serie de marcas en la banda de acero. Concretamente, cada vez que dicho cilindro de un giro completo, formará una nueva marca. Por este motivo estamos ante un problema de gran relevancia. Una indicación de la calidad de una banda de acero es el número de defectos presentes en su superficie. Mientras que otros tipos de defectos que se puedan producir en el acero se reducen simplemente a un agujero o un arañazo, los defectos producidos por los cilindros de trabajo del tren acabador generan un número muy elevado de defectos sobre la superficie del acero, por lo que esta situación debe ser detectada y corregida lo antes posible.

1.1. Objetivos

El problema que se pretende resolver se puede reducir a realizar una agrupación de elementos (defectos) pertenecientes a un conjunto, tomando aquellos que cumplan ciertas condiciones. Para realizar este tipo de tareas se utilizan unos algoritmos conocidos como algoritmos de *clustering*. El primero de los objetivos a alcanzar en esta tesis sería realizar un estudio sobre estas técnicas y estudiar su posible aplicación a este problema. Adicionalmente, convendría estudiar la aplicación de métodos alternativos, como el uso de técnicas de procesamiento de señales que también podrían ser viables. Aquellos métodos que se consideren sean más adecuados, se utilizarán para desarrollar una técnica que realice la

agrupación de los defectos periódicos de forma automática.

Normalmente, a la hora de desarrollar una herramienta que realice algún tipo de agrupación o clasificación, siempre se cuenta, para cada una de las pruebas a realizar, con una "clasificación perfecta", también llamada *ground truth*, realizada por un usuario experto. Disponer del *ground truth* es esencial para poder valorar las clasificaciones obtenidas por las nuevas técnicas a desarrollar. Un problema que se presenta en este caso es que no se dispone de tal usuario experto, y por tanto, tampoco de un *ground truth*. Queda esta tarea como un punto más a realizar, teniéndose que desarrollar una herramienta que permita, de un modo sencillo, obtener el *ground truth* de una serie de bandas que serán utilizadas posteriormente para realizar las tareas de entrenamiento (si fuese necesario) y *test*. Una vez se disponga de éste, se podrá utilizar para valorar la calidad de las clasificaciones de defectos periódicos realizadas de forma automática por las técnicas que se desarrollen.

El siguiente paso sería desarrollar una o varias herramientas que realicen la clasificación de los defectos periódicos utilizando e integrando los algoritmos más adecuados de los estudiados en el punto primero. Estas aplicaciones tienen que trabajar en tiempo real. La información que proporcionen tiene que estar disponible antes de comenzar la laminación de la banda siguiente, por lo que se dispondrá de un tiempo de computación inferior a dos minutos. Se debería estudiar, para cada caso, la forma de minimizar los tiempos de computación, mediante la poda de los espacios de búsqueda o alguna técnica heurística, que permita llegar a la solución en el menor tiempo posible.

Una vez desarrolladas las herramientas, deberán ser sometidas a una fase de entrenamiento, para lo que se deberían utilizar bandas de acero representativas de la realidad. Dependiendo de los algoritmos finalmente utilizados para el desarrollo de estas aplicaciones, la fase de entrenamiento servirá para determinar qué parámetros de configuración de cada uno de ellos son los más idóneos para obtener resultados satisfactorios. Esto se puede realizar mediante un diseño experimental factorial completo, o mediante una búsqueda inteligente. Para poder determinar qué configuración de cada algoritmo ofrece mejores resultados, es necesario disponer de algún mecanismo que valore la calidad de las soluciones. Será una tarea de gran importancia elegir adecuadamente las métricas que se van a utilizar. Si una vez finalizada la fase de entrenamiento los resultados obtenidos no fueran suficientemente satisfactorios, podría tratar de mejorar la calidad de la información de partida disponible realizando un procesamiento *offline* de las imágenes de los defectos detectados.

La siguiente tarea sería evaluar cada herramienta, simulando el entorno industrial en el que van a trabajar en un laboratorio, a fin de optimizarlas y de depurar errores. Aquella que haya obtenido un mayor rendimiento será la que posteriormente se utilice para funcionar en tiempo real en la instalación industrial.

El último paso sería instalar la herramienta en los equipos de trabajo de la

línea de producción. Inicialmente se podría evaluar la eficacia del nuevo sistema de inspección comparando los resultados proporcionados por él y por el sistema que está funcionando actualmente de forma manual por un usuario experto. Una vez comprobado que el nuevo algoritmo funciona correctamente para distintos tipos de bandas y mejora las soluciones proporcionadas por el sistema actual cumpliendo las restricciones de tiempo real impuestas, puede dejarse definitivamente instalado en los equipos de trabajo. Este último paso serviría, por tanto, para validar las técnicas desarrolladas. La puesta en funcionamiento en un laboratorio también ayuda a validar estas técnicas, pero en menor medida, ya que es muy difícil reproducir en laboratorio todas las dificultades que pueden surgir en un entorno real.

1.2. Organización de la tesis

La documentación de esta tesis está organizada de la siguiente forma:

En el capítulo 2 se describe de forma general el proceso de laminación de bandas de acero, ya que el conocimiento de ciertos aspectos de este proceso es fundamental para entender de donde surge el problema y como puede ser abordado. A continuación, y teniendo en cuenta el proceso de laminación del acero, se define el problema en el que se centra la tesis: los defectos periódicos. En este capítulo se define formalmente lo que se entiende por defecto periódico y cuales son sus características. Finalmente, se describen una serie de necesidades que surgen en la planta siderúrgica en relación a este problema y cómo el desarrollo de esta tesis puede ayudar a mejorar los procesos de inspección existentes.

En el capítulo 3 se detalla el estado del arte en la detección de defectos superficiales en distintos tipos de materiales y concretamente en el caso particular de las bandas de acero. Se describen las fases que tiene que llevar a cabo un proceso de inspección de bandas de acero que sea capaz de detectar defectos periódicos. Estas fases son: la detección de los defectos superficiales existentes en la banda, la clasificación de los mismos y la agrupación de los defectos superficiales en defectos periódicos. Esta agrupación se ha de basar en la posición, dimensiones (datos obtenidos de la fase de detección), características o tipo de defecto (datos obtenidos en la fase de clasificación) de los defectos superficiales detectados. En este capítulo se describen brevemente las técnicas más habituales para realizar estas fases, finalizando con la enumeración y descripción de la funcionalidad de algunas de las herramientas comerciales más utilizadas a nivel mundial en esta tarea.

En el capítulo 4 se presenta la problemática de realizar la detección de defectos periódicos sin utilizar una herramienta *software* que lo realice automáticamente. Un defecto periódico cuenta con demasiadas características como para poder tener cuenta de ellas mentalmente por un humano. Si tenemos en cuenta el hecho

de que en una banda pueden existir varios defectos periódicos simultáneamente el problema se agrava, especialmente para las bandas que tengan una elevada densidad de defectos superficiales. Otro problema que surge relacionado con la clasificación manual de defectos periódicos, es que para realizar cualquier prueba de funcionamiento de una herramienta de detección de defectos periódicos, o para comparar varias de éstas, es necesario disponer de la solución óptima de varios casos de ejemplo. Dicha solución óptima no puede ser obtenida mediante una herramienta, puesto que dicha herramienta siempre tendrá una tasa de error (si no la tuviera no sería necesario desarrollar otra), y realizarlo de forma manual es complejo, tedioso y pueden cometerse errores fácilmente. Por estos motivos, se propone una herramienta de ayuda a la clasificación manual de bandas de acero, que permita obtener una clasificación de defectos periódicos óptima para un conjunto de bandas a partir de la posición, dimensiones, tipo y morfología de cada uno de los defectos periódicos detectados.

En el capítulo 5 se describe la técnica propuesta para realizar la detección y caracterización de los defectos periódicos. Dicha técnica se divide en tres aspectos. El primero es la representación de la información que se necesita manejar en la memoria del computador. Ésta debe de ser lo más eficiente posible, para evitar que la herramienta a desarrollar consuma una gran cantidad de memoria. Además, el acceso a los datos debe de ser lo suficientemente rápido como para que la herramienta pueda funcionar en tiempo real. El segundo aspecto es el algoritmo de detección a utilizar, que debe de ser capaz de detectar y caracterizar todos los defectos periódicos en tiempo real y, además, debe de ser fácilmente parametrizable, para que pueda ser modificado su comportamiento de forma sencilla en el futuro si ésto fuese necesario. El último aspecto consiste en determinar la parametrización por defecto del algoritmo. Los distintos parámetros del algoritmo son definidos en función de ciertos aspectos clave de la laminación del acero.

Para poder realizar una optimización de la herramienta de detección o para poder comparar las detecciones realizadas por varias herramientas es necesario poder comparar dichas detecciones. Esto implica que las detecciones deben poder ser cuantificadas. En el capítulo 6 se proponen varios métodos para realizar dicha cuantificación. Esto supone definir lo que es considerado un acierto o un fallo por parte de la herramienta de detección, así como decidir el modo en que el número de aciertos y el número de fallos debe de combinarse para obtener un valor numérico que refleje el grado de similitud de una detección con la solución óptima.

En el capítulo 7 se detalla el diseño experimental propuesto para obtener la configuración óptima de la herramienta de detección. El objetivo de esta experimentación es, además de obtener dicha configuración, elegir el método de cuantificación de las detecciones más adecuado de los propuestos en el capítulo 6. Puesto que el espacio de búsqueda en la determinación de la configuración

óptima es muy grande, se propone el uso de tecnologías *grid* para reducir el tiempo de exploración lo suficiente como para que pueda ser realizado en poco tiempo.

En el capítulo 8 se muestran los resultados obtenidos durante la experimentación. Estos resultados suponen la configuración óptima para cada uno de los métodos de cuantificación. El comportamiento de la herramienta desarrollada es analizado para cada configuración y método con el objetivo de determinar cual es el que realiza mejor las detecciones de los defectos periódicos. Además, se realiza una comparativa de funcionamiento entre la herramienta desarrollada y una herramienta comercial ampliamente utilizada a nivel mundial para detectar defectos periódicos.

Para finalizar, en el capítulo 9 se recogen las conclusiones más relevantes a las que se ha llegado al finalizar esta tesis. Se resumen las aportaciones realizadas y la difusión que se ha realizado del trabajo efectuado en congresos internacionales. Este último capítulo finaliza con la propuesta de varias líneas de investigación que se derivan de la realización de esta tesis.

Capítulo 2

Contexto Industrial

En este capítulo se proporciona una visión general sobre el proceso de laminación de bandas de acero. Conocer el modo en que se fabrican estas bandas es fundamental para poder desarrollar una técnica eficaz que agrupe los defectos superficiales repetidos periódicamente. Asimismo, también es necesario describir lo que se entiende por defecto periódico, y qué condiciones deben cumplirse para que un conjunto de defectos superficiales sean considerados un defecto periódico. Finalmente se expone la motivación de esta investigación, que surge a partir de la necesidad reducir el impacto que supone la presencia de defectos periódicos en la calidad de las bandas de acero.

2.1. Laminación de acero

Hasta llegar a su forma final de banda larga bobinada, el acero atraviesa diferentes fases. En la figura 2.1 se muestra un esquema de un tren de laminación de acero.

En el horno se calienta el acero hasta una temperatura adecuada, que dependerá del tipo de acero, dimensiones y características finales deseadas para la banda. En el horno, el acero pasa por tres etapas:

- Precalentamiento: Los debastes de acero llegan a una temperatura aproximada de 600°C.
- Calentamiento: Se aumenta la temperatura hasta un máximo de 1250°C.
- Igualación: Se calienta el interior hasta que alcanza la misma temperatura que la parte exterior del desbaste.

Una vez sale del horno, en el tren desbastador se le quita la cascarilla que se haya podido formar en la superficie, y mediante una caja de laminación reversible, es laminado hasta obtener un espesor de entre 34 - 45mm. Al mismo tiempo se le da el ancho deseado, siempre entre 600 y 1575mm. Antes de entrar al tren acabador, donde se volverá a alisar hasta obtener el espesor deseado,

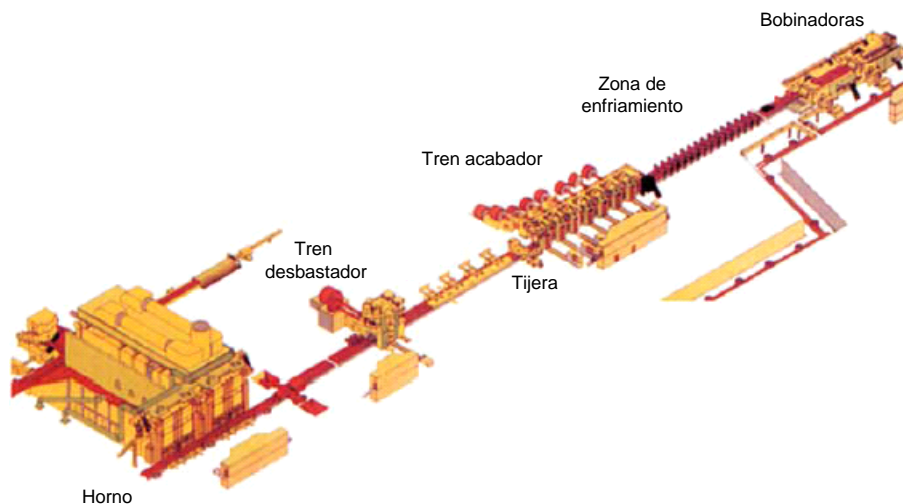


Figura 2.1: Esquema de un tren de laminación de acero

se corta la cabeza y la cola del chapón para evitar que tome formas extrañas. En el tren acabador, el chapón se somete a la presión ejercida por siete cajas de cilindros para, progresivamente, ir reduciendo su grosor hasta alcanzar aquel que se desea. Dependiendo del tipo de banda que se desee laminar en cada momento, la banda tendrá un grosor de 1,5 - 16mm. El acero sale del tren acabador a una temperatura aproximada de 900°C. Antes de proceder a su bobinado es necesario enfriarla, para lo que se le aplican chorros de agua fría a sus dos caras en la zona de enfriamiento. De este modo su temperatura puede disminuir hasta 400°C. Finalmente las bobinadoras enrollan la banda, dejándola lista para su posterior distribución.

La parte de mayor interés en este proceso está en el tren acabador, donde se generan la mayor parte de los defectos de naturaleza periódica. En la figura 2.2 se muestra un esquema de un tren acabador de siete cajas. El paso de la banda por cada una de las cajas hace disminuir su espesor hasta alcanzar aquel que haya sido programado.

Aunque existen cajas de distintos tipos, las más comunes son cajas con cuatro cilindros: dos de apoyo y dos de trabajo. Estos cilindros deben ser más duros que el material a laminar. Los cilindros de apoyo se encargan de transmitir esfuerzo a los de trabajo, que son los que entran en contacto directo con el material que se va a laminar (figura 2.3). Además de éstas, existe una gran variedad de cajas de

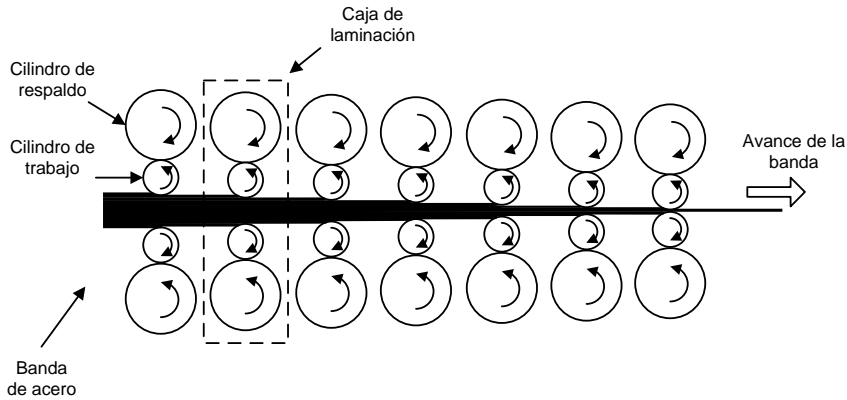


Figura 2.2: Laminación de una banda de acero en el tren acabador

laminación. Pueden tener desde dos a veinte cilindros, dependiendo de la presión que tengan que ejercer.

La superficie de los cilindros de trabajo debe ser totalmente lisa para obtener una laminación perfecta. Si en esta superficie estuviera adosado un objeto extraño o presentara una grieta, al entrar el cilindro en contacto con el material a laminar quedaría una marca en este último. El hecho que hace especialmente grave esta situación reside en que cada vez que el cilindro de trabajo termine un giro completo, volverá a formar una nueva marca sobre el material laminado, y ésta se repetirá por cada giro del cilindro hasta que éste haya sido sustituido por otro.

2.2. Definición de defecto periódico

Un cilindro de trabajo defectuoso puede generar una gran cantidad de defectos en el acero que pase por su caja de laminación hasta que éste haya sido sustituido. En ocasiones puede suceder que antes de proceder a su sustitución se hayan laminado varias bandas de acero, por lo que todas ellas presentarían defectos periódicos idénticos.

Con el fin de que el resto del documento sea lo más claro posible, se definen los siguientes conceptos, ilustrados en la figura 2.4:

- Defecto individual. Cada uno de los defectos superficiales detectados sobre una de las dos superficies de la banda tras finalizar su laminación. En la figura 2.4 cada estrella representa un defecto individual distinto.

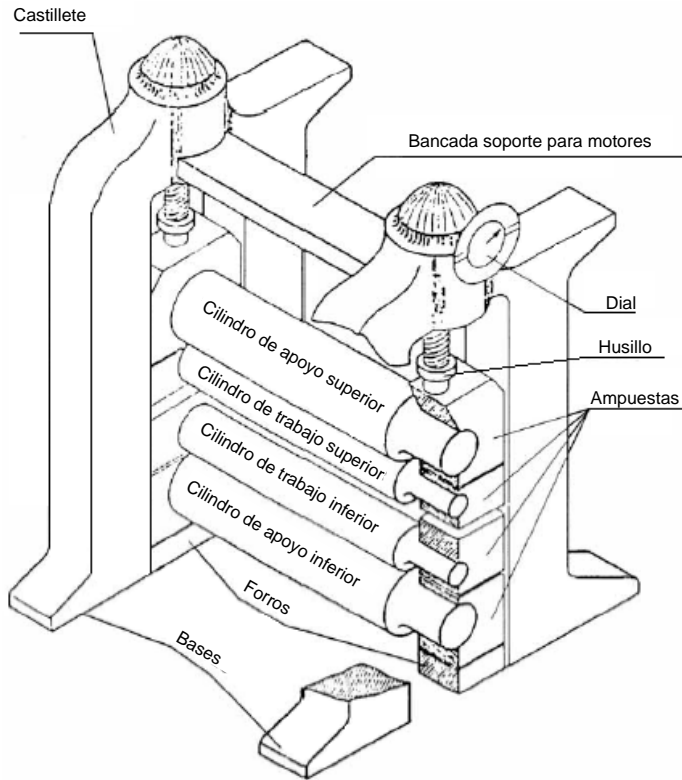


Figura 2.3: Caja de laminación del tren acabador

- Coordenada transversal de un defecto individual. Es la posición que tiene un defecto individual en la dirección perpendicular al avance de la banda por el tren acabador. La coordenada transversal cero coincide con un borde de la banda, y la coordenada transversal del borde opuesto debe coincidir con el ancho de la banda.
- Coordenada longitudinal de un defecto individual. Es la posición que tiene un defecto individual en la dirección de avance de la banda por el tren acabador. La coordenada longitudinal cero coincide con el borde de comienzo de la banda (entendiendo comienzo como la parte que es laminada primero). La posición longitudinal del borde opuesto debe coincidir con la longitud de la banda.
- Defecto periódico. Se trata de una agrupación de defectos individuales

- pertenecientes a la misma banda, que se han generado de forma periódica por un mismo cilindro de trabajo.
- **Ámbito de un defecto periódico.** Es aquella parte de la banda en la cual existen defectos individuales pertenecientes a un defecto periódico determinado.
 - **Periodo de un defecto periódico.** Es la separación (habitualmente medida en milímetros) existente entre dos defectos individuales consecutivos que pertenecen a un defecto periódico determinado.
 - **Defecto periódico parcial.** Se trata de una agrupación de defectos individuales pertenecientes a la misma banda, que se han generado de forma periódica por un mismo cilindro de trabajo, pero cuyo número es demasiado bajo como para que sean considerados un defecto periódico. El mínimo número de defectos individuales necesarios para constituir un defecto periódico debe ser fijado de antemano. Un valor habitual es 11.

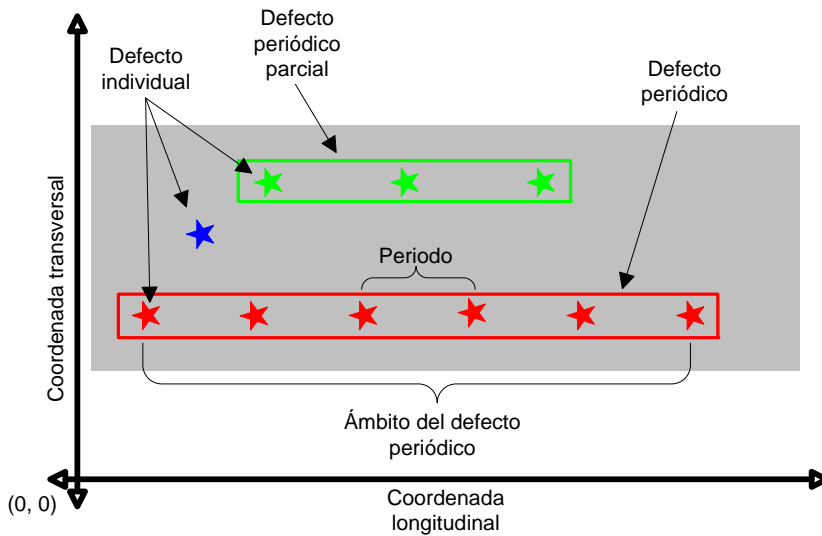


Figura 2.4: Características de un defecto periódico

Para que un conjunto de defectos individuales pueda ser considerado un defecto periódico, además de tener que superar el mínimo número de defectos para no ser considerado un defecto periódico parcial, tienen que coincidir espacial y morfológicamente. Que exista coincidencia morfológica significa que todos los

defectos individuales deben tener la misma forma. Si todos ellos han sido generados por un mismo desperfecto en un cilindro de trabajo, todos ellos deberían tener la misma forma. Que exista coincidencia espacial implica que se cumplan dos condiciones. La primera es que todos los defectos estén situados en la misma coordenada transversal, ya que la grieta, bulto o deformación del cilindro de trabajo que está generando los defectos, está situada siempre en la misma posición dentro del cilindro. La segunda condición es que la separación entre dos defectos consecutivos debe ser siempre constante, e igual al periodo del defecto periódico. Por tanto, la separación entre dos defectos cualesquiera del mismo defecto periódico debe ser forzosamente un múltiplo de dicho periodo.

El motivo de haya que establecer un número mínimo de defectos individuales que pueden formar un defecto periódico es para evitar detectar incorrectamente defectos periódicos que en realidad no lo son, por el hecho de que los pocos defectos individuales que lo forman coincidan espacial y morfológicamente por casualidad. En la figura 2.5 se representan los defectos individuales registrados en la superficie superior de una banda de acero real. En algunos casos, como este ejemplo, pueden existir bandas con una elevada densidad de defectos individuales, sobre todo en las partes inicial y final de la banda. Con una densidad de defectos tan elevada, no sería difícil que unos pocos defectos individuales coincidan espacial y morfológicamente por casualidad.

Teniendo en cuenta estos conceptos, se puede definir la caracterización de un defecto periódico como la determinación de todas sus características, es decir:

- Ámbito
- Periodo
- Conjunto de defectos individuales que lo forman
- Posición transversal promedio de sus defectos individuales
- Morfología de sus defectos individuales
- Dimensiones promedio (longitud y anchura) de sus defectos individuales

De este modo, se puede decir que la detección de los defectos periódicos existentes en una banda de acero consiste en obtener su caracterización.

Sin embargo, la definición ideal de defecto periódico dada anteriormente e ilustrada en la figura 2.4 es poco realista. Suele ser habitual que algunos de los defectos individuales que componen un defecto periódico no hayan sido detectados por el mecanismo de detección de defectos superficiales utilizado. Una definición más realista de defecto periódico debe tener en cuenta que dentro del ámbito de un defecto periódico puede faltar algún defecto individual, al cual

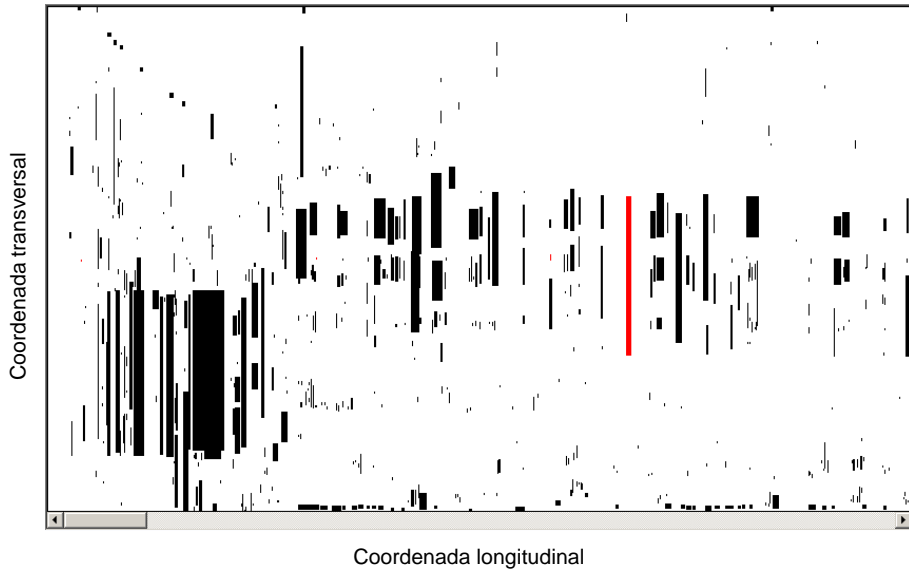


Figura 2.5: Ejemplo de densidad alta de defectos individuales

se suele denominar defecto perdido. Según se ilustra en la figura 2.6, los defectos perdidos pueden aparecer aislados, o puede haber varios consecutivos. En el caso de que el número de defectos perdidos consecutivos supere un número prefijado, los defectos individuales que forman ese defecto periódico se pueden dividir en secciones. Aunque estas secciones puedan aparecer alejadas entre sí dentro de una misma banda, siguen perteneciendo a un mismo defecto periódico siempre que siga habiendo coincidencia morfológica, estén situados en la misma coordenada transversal y su periodo sea el mismo. Otro aspecto que se tiene que tener en cuenta, es que el sistema que se haya utilizado para la detección de los defectos superficiales nunca es perfecto. Las coordenadas longitudinal y transversal de cada defecto individual pueden presentar un pequeño error. Como ilustra el defecto periódico pintado de rojo en la figura 2.6, aunque un conjunto de defectos individuales presente una ligera variación de posición transversal, deberían seguir considerándose como un defecto periódico siempre que esta diferencia esté dentro de unos límites razonables fijados de antemano. Del mismo modo, también puede existir una ligera diferencia entre la distancia que separa a dos defectos individuales consecutivos del mismo defecto periódico, bien por la misma razón que antes, o bien porque al pasar el acero entre los dos cilindros de trabajo de una misma caja, éste puede deslizarse ligeramente, en vez de moverse a la misma velocidad que los cilindros. Del mismo modo que para la posición

varias bandas consecutivas con defectos periódicos formados por defectos individuales con la misma forma. Un objetivo importante es mejorar la calidad de las soluciones propuestas por los sistemas comerciales de inspección, utilizando la definición de defecto periódico dada en la sección 2.2. Por tanto, las necesidades que surgen son las siguientes:

- Recibir una agrupación de defectos más completa que la que se obtiene actualmente.
- La solución propuesta, no debe ser peor que la obtenida con los sistemas comerciales. Esto significa que, además de agregar posibles defectos periódicos no detectados por ellos, se tiene que completar los defectos periódicos haya detectado incluyendo defectos individuales que pertenezcan a dicho defecto periódico y no hayan sido incluidos. Además de esto, no se debería añadir a la solución ningún defecto periódico que no lo sea, y no se debe añadir a ningún defecto periódico defectos individuales que no pertenezcan a él.
- La solución debe estar disponible en un breve lapso de tiempo tras la finalizar la laminación de cada banda, con el objetivo de poder sustituir los cilindros de trabajo defectuosos antes de que generen nuevos defectos.

Cumplir los tres puntos anteriores garantiza que, en el peor de los casos, se obtenga la misma solución que la que se obtendría con un sistema actual. En el resto de casos siempre estaríamos ante una solución mejor. Esto significa que, además de que los trabajadores de la planta dispondrán de una información más completa a la hora de decidir si cambiar o no un cilindro de trabajo, no se generarán avisos falsos.

Tanto detener la producción debido a una falsa alarma, como continuar laminando bandas mientras existe un cilindro de trabajo defectuoso supone un coste económico severo. Por tanto, el objetivo último de esta investigación es generar nuevas técnicas de detección de defectos periódicos que minimicen la ocurrencia de este tipo de situaciones.

Capítulo 3

La inspección de defectos superficiales

En este capítulo se muestran los métodos utilizados en la actualidad para inspeccionar las superficies de productos laminados (más concretamente en metales) en busca de defectos. Este proceso se puede dividir en tres fases:

- **Detección:** La superficie del producto laminado es inspeccionada en busca de algún tipo de defecto. El objetivo de esta fase es, para cada defecto detectado, obtener su posición y tamaño.
- **Clasificación:** Cada uno de los defectos detectados en la fase anterior debe ser clasificado. El objetivo de esta fase es, en función de las características de éste, asignarle (siempre que sea posible) alguno de los tipos de defecto conocidos.
- **Caracterización de defectos periódicos:** En el caso de que un conjunto de defectos individuales (de los detectados en la fase anterior) haya sido generado de forma periódica, estos defectos deben ser agrupados como parte de un defecto periódico. El objetivo de esta fase es realizar dicha agrupación teniendo en cuenta la posición y tamaño de cada defecto (detección) y sus características o clase (clasificación).

La literatura científica hasta la fecha sobre la caracterización de defectos periódicos es muy escasa, y también muy reciente. Esto indica que estamos ante un área de investigación poco explorada y de creciente interés en el mundo industrial. Ciertamente es que este problema no ha pasado desapercibido hasta hoy. En 1974 se patentó el primer método de abordar este problema [Hosoe *et al.*, 1974]. En la actualidad, aunque varios sistemas comerciales encargados de realizar labores de inspección de materiales laminados son capaces de detectar defectos periódicos, no publican el modo en que lo realizan.

3.1. Detección de defectos superficiales

Actualmente, todas las instalaciones dedicadas a la laminación de metales poseen algún sistema de control de calidad de los productos que fabrican. La inspección de la superficie de las bandas laminadas es difícil de realizar manualmente por un humano simplemente mirándolas. De acuerdo con varios estudios, la inspección visual realizada por humanos detecta, en promedio, tan sólo entre el 60 % y el 75 % de los defectos individuales [Schicktanz, 1993]. Realizando la inspección de este modo, una gran parte de los defectos quedarían sin detectar. Además, los defectos periódicos son prácticamente imposibles de detectar de este modo, ya que obligaría al supervisor a acordarse de la forma, posición y separación entre dos defectos individuales consecutivos. En otras ocasiones, dicha inspección es imposible que sea realizada por un humano si el producto que se está fabricando es inaccesible para el trabajador por algún tipo de obstáculo, por ejemplo, y como sucede con el proceso de laminación de bandas de metal, cuando existe una temperatura muy elevada. Por ello es que en todas las factorías se utiliza algún sistema automático para realizar las labores de inspección. La única característica común entre todos ellos es que siempre son no invasivos, es decir, que evitan a toda costa entrar en contacto con la superficie del metal con el fin de no generar nuevos defectos. Las técnicas más habituales para efectuar la detección de defectos superficiales son el uso de corrientes eléctricas inducidas o la grabación de las superficies mediante cámaras digitales cuyas imágenes son posteriormente procesadas mediante técnicas de visión por computador, aunque existen otras que se describen a continuación.

3.1.1. Corriente de Foucault

Tradicionalmente, este método se ha utilizado para detectar defectos superficiales producidos durante la laminación de alambres, barras o varillas, principalmente. Se ha comprobado que esta técnica es la que ofrece mejores resultados para este tipo de productos [Bae y Kim, 2001]. Este sistema se basa en la corriente de Foucault (también denominada corriente parásita), un fenómeno electromagnético producido cuando un conductor está sometido a un campo magnético variable (en [NTD, 2010] se describe con detalle este sistema). En la figura 3.1 se muestra el esquema de un sensor que utiliza la corriente de Foucault para detectar defectos superficiales.

Este sensor consta de dos bobinas entrelazadas que envuelven el conductor que se desea analizar. Una de estas dos bobinas conduce una corriente alterna, que genera un campo magnético variable. Este campo magnetiza el metal e induce una corriente eléctrica en él, que a su vez genera otro campo magnético que se opone al primero, como enuncia la Ley de Lenz. La presencia de algún tipo de defecto superficial, hace variar la intensidad de ese segundo campo mag-

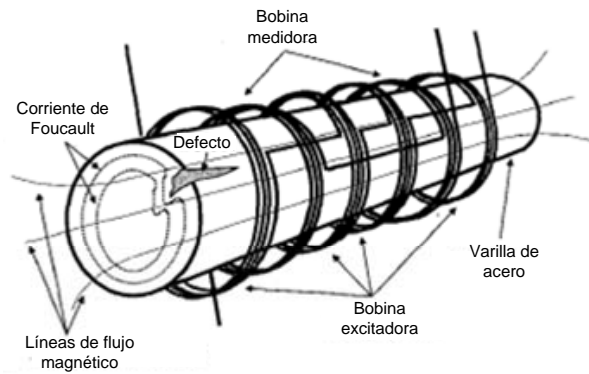


Figura 3.1: Sensor de corriente de Foucault

nético, medido por la otra bobina que forma el sensor. De este modo, se puede determinar con precisión el lugar exacto del defecto, así como una estimación de la gravedad de éste, ya que cuanto mayor sea el defecto, más variación existirá en el campo magnético [Brauer y Ziolkowski, 2008]. El principal problema que presenta esta técnica, es que proporciona como salida una única señal analógica que representa la uniformidad de la superficie del conductor como la mostrada en la figura 3.2. Puede clasificarse cada intervalo de tiempo en función de la intensidad de la señal (cuanto mayor sea ésta, más grave será el defecto).

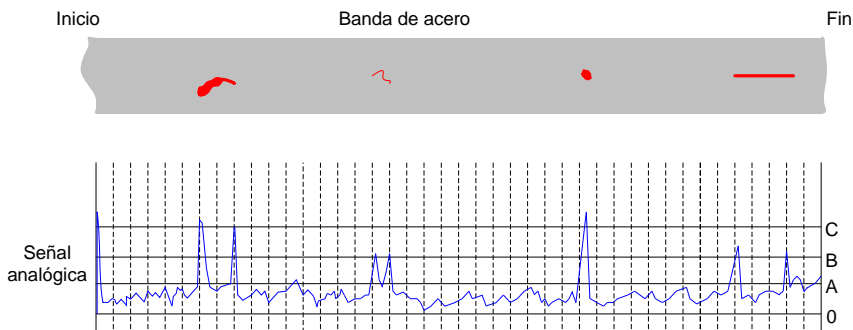


Figura 3.2: Fuerza de Lorentz medida en un alambre con defectos

Utilizando esta técnica, se puede determinar con precisión y de un modo relativamente sencillo, la posición longitudinal que ocupa cada defecto superficial,

así como una medida de la gravedad de éste. Además, al contrario de lo que sucede con los sistemas de visión por computador (comentados más adelante), este proceso es muy rápido, pudiendo realizarse sin ningún problema en tiempo real. De este modo, los operarios que estén trabajando en ese momento en la línea de producción pueden saber al instante cuando se están produciendo defectos, pudiendo solucionar el problema que los pueda estar causando con prontitud. Desgraciadamente, la información proporcionada por este sistema es escasa en el caso de láminas o chapas, ya que no se podría determinar la posición transversal de dos defectos que compartan posición longitudinal. La única información disponible en este caso sería la posición longitudinal de ambos y un valor analógico correspondiente a la combinación de la gravedad de ambos. Además de este problema, tampoco sería posible determinar qué ha provocado el defecto o la naturaleza de éste (agujero, marca de cilindro, etc).

3.1.2. Líneas láser

El uso de líneas láser también es aplicable en este problema. La idea principal es disponer de un emisor láser que proyecte una línea sobre la superficie a inspeccionar, mientras que un receptor que sólo capta luz de la longitud de onda del laser emisor, recibe la luz reflejada. Analizando la línea obtenida por el receptor es posible detectar defectos superficiales. Esta técnica tiene varias ventajas, como la posibilidad de inspeccionar grandes áreas pudiendo realizar las mediciones muy rápidamente [Persson, 1999]. Además, las imágenes obtenidas utilizando esta técnica poseen mayor resolución y mayor contraste [Sullivan, 1986]. A diferencia de la técnica basada en la corriente de Foucault, en este caso no es necesario que el material a inspeccionar sea metálico. Es posible proyectar una línea láser sobre cualquier tipo de material, lo que hace factible el uso de esta técnica para inspeccionar una gran variedad de materiales, como hojas de papel, tela o vidrio [Cielo, 1988]. Igualmente, también es aplicable a la inspeccion de bandas de acero.

Existen varios estudios sobre la inspeccion basada en líneas láser, como por ejemplo la presentada en [Abuazza *et al.*, 2003] y [Abuazza *et al.*, 2004] donde utilizan un conjunto de 5 diodos láser para buscar defectos superficiales en varios tipos de materiales distintos como acero inoxidable, cobre, latón y policarbonato. En [Fan y Moalem, 1998], se presenta un método para detectar y clasificar defectos superficiales utilizando líneas láser. Otra aplicación importante de esta técnica es en la detección de defectos en *Ball Grid Arrays* (también denominados BGA) [Xue *et al.*, 2001]. Las BGA son unas pequeñas bolas de estaño utilizadas para soldar componentes informáticos. Normalmente su tamaño es muy pequeño (desde 0.3 a 1.5 milímetros), por lo que la alta resolución proporcionada por esta técnica es imprescindible para poder realizar la inspección.

El mayor problema que presenta esta técnica es que al basarse en la intensidad

de la luz recibida para reconstruir la superficie del material inspeccionado, es muy sensible a variaciones entre los sensores y la superficie [Butler y Gregoriou, 1992]. Además, la intensidad de luz recibida también depende del propio material (concretamente de su reflectividad), por lo que el sistema debe de ser ajustado cada vez que se inspeccione un material distinto.

3.1.3. Ultrasonidos

Otro método utilizado para realizar tareas de inspección son los ultrasonidos. El principio de funcionamiento es similar al utilizado por los murciélagos para orientarse en ausencia de luz. Un emisor se encarga de emitir un ultrasonido contra el objeto que se desea inspeccionar. Si existe algún defecto o deformación en éste, la onda es reflejada y posteriormente detectada por un receptor. A partir de dicha onda es posible determinar el tamaño y la posición del defecto. Concretamente, el tiempo transcurrido desde la emisión de la onda hasta su recepción puede ser utilizado para determinar la posición, y la intensidad de ésta se corresponde con su tamaño.

Igual que ocurría con el método de Foucault, la información recibida es baja, limitándose a la posición y tamaño del defecto en cuestión, lo que hace que sea muy difícil (o imposible) determinar el origen de dicho defecto. Por otra parte, este método cuenta con varias ventajas, como que puede ser utilizado a elevadas temperaturas, no necesita entrar en contacto con el material inspeccionado y no está limitado únicamente a la búsqueda de defectos superficiales, sino que puede utilizarse para buscar defectos internos [Baillie *et al.*, 2007]. Esta característica resulta muy útil para comprobar la integridad de estructuras, soldaduras o elementos de sujeción, como puede ser el caso de cables multifilares utilizados para el anclaje y sujeción de tendido eléctrico, sujeción de puentes [Rizzo y di Scalea, 2005] o las soldaduras de las diferentes piezas que forman el chasis de un automóvil [Kercel *et al.*, 1999]. Otro caso de aplicación es para medir el grosor de tuberías metálicas y la detección de defectos que puedan existir, especialmente en su superficie interior, inaccesible para otros métodos de inspección [Park *et al.*, 1996].

Debido al alto coste que supone la implantación de un sistema de este tipo, no suele utilizarse para la detección de defectos superficiales, tarea que puede realizarse por otros sistemas más baratos y que pueden proporcionar información más completa sobre éstos. Además, por lo general la relación señal-ruido de la señal captada es baja [Kercel *et al.*, 1999].

En [Vilasmongkolchai *et al.*, 2010] se utiliza un sistema de ultrasonidos para la detección de defectos en chapas de acero. A diferencia de lo que se pretende realizar en esta tesis, el objetivo de dicho estudio es la detección de defectos internos cercanos a la superficie del acero.

3.1.4. Rayos X

Los rayos X también pueden utilizarse para la detección de defectos. Su ámbito de aplicación es muy amplio, cubriendo varios de los ejemplos dados para las técnicas anteriores: inspección de *Ball Grid Arrays* [Rooks *et al.*, 1995], soldaduras [Daum y Heidt, 1986], y defectos internos [Pieringer y Mery, 2010], aunque el proceso en que es más utilizado es en la inspección de llantas de aluminio [Theis y Kahrs, 2002]. Este último caso requiere de una inspección muy minuciosa para asegurar la completa ausencia de defectos (tanto superficiales como internos), puesto que la fabricación de llantas defectuosas puede suponer un peligro para la integridad física de las personas. Es por este motivo que se utilizan rayos X para realizar su inspección, pese a que se trate de un método caro.

El modo en que se aplica esta técnica es realizando radiografías de los materiales a inspeccionar. Dichas radiografías son procesadas utilizando métodos de visión por computador, que detectan la posición y gravedad de los defectos.

Puesto que se trata de un método caro, sólo es aplicado a los métodos que lo requieran específicamente. Por ello, este método no es utilizado para la inspección superficial de acero. Aunque este método genera imágenes de los materiales a inspeccionar, éstas presentan una serie de inconvenientes que no aparecen en el caso de las imágenes superficiales tomadas por cámaras convencionales. Estos inconvenientes son los mismos que existían en el caso de los ultrasonidos: que los datos obtenidos vienen acompañados de mucho ruido [Boerner y Strecker, 1988] y que pequeñas variaciones en los parámetros de configuración del aparato emisor de rayos X procuden grandes diferencias en las imágenes obtenidas, lo que hace que tengan que ser manejados con mucho cuidado [Mery *et al.*, 2002].

3.1.5. Visión por computador

Es la técnica más utilizada en la inspección de láminas de metal, aunque también es aplicable a láminas de material no metálico, como plástico, papel o telas. De hecho, una gran parte de las empresas dedicadas a inspección de superficies que utilizan sistemas de visión por computador no se limitan sólo a materiales metálicos.

El principio de funcionamiento de este tipo de técnicas, resumido en [Malamas *et al.*, 2003], consiste en iluminar la superficie que se va a inspeccionar y tomar imágenes utilizando cámaras digitales, normalmente, cámaras con sensores CCD (*charge-coupled device*). Estas imágenes se tienen que procesar en tiempo real para determinar en cuáles de ellas existen defectos. Si se almacenaran todas las imágenes para determinar a posteriori en cuáles existen defectos, el espacio requerido para almacenarlas podría ser muy elevado.

Los cuatro pasos típicos que hay que seguir en cualquier proceso de detección de defectos son [Wu *et al.*, 2008]:

- Extracción del *background*
- Calcular niveles de gris
- Determinar umbrales
- Buscar la región de interés

Este sistema se basa siempre en imágenes tomadas en niveles de gris, donde el nivel de gris del fondo, tiene que ser uniforme y claramente diferente del nivel de gris de los defectos. En el caso de que el nivel de gris del fondo varíe, el proceso de separar el fondo de los defectos puede ser muy complejo. Para que los niveles de gris de fondo y defectos difieran lo más posible, es vital utilizar un correcto sistema de iluminación, o aplicar a las imágenes algún tipo de filtro que incremente el contraste. Dos sistemas de iluminación bastante extendidos en la detección de defectos en la superficie de metales son los conocidos como iluminación de campo oscuro o *Dark Field Illumination* (figura 3.3 a) e iluminación de campo claro, o *Bright Field Illumination* (figura 3.3 b).

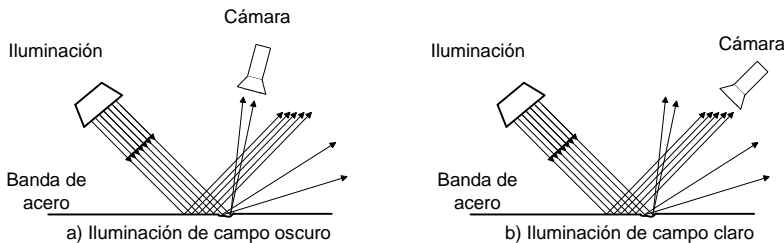


Figura 3.3: Tipos de iluminación

El primero de estos sistemas evita que la luz proveniente del sistema de iluminación llegue a la cámara, salvo que ésta sea desviada hacia ella por algún defecto superficial. El segundo utiliza el sistema contrario, pretendiendo que toda la luz llegue a la cámara, salvo la desviada por la presencia de defectos. La iluminación *Bright* suele ser la más adecuada para la detección de los defectos más comunes, mientras que la iluminación *Dark* es más eficaz para captar ciertos tipos de defectos, como los arañosos.

Sabiendo el nivel de gris que le corresponde al fondo de la imagen, a partir de un histograma como el de la figura 3.4 es sencillo determinar los niveles de gris de los posibles defectos presentes en ella.

El umbral puede establecerse de antemano y dejarlo fijo, o utilizar alguna técnica de determinación automática del umbral, como la expuesta en [Hui-Fuang, 2006].

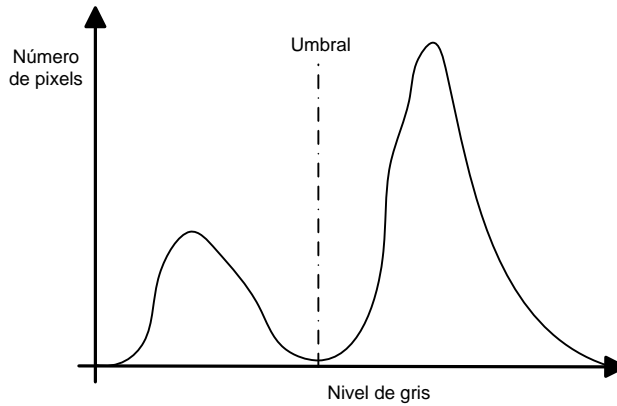


Figura 3.4: Histograma de una imagen con defecto

Una vez que los defectos han sido detectados, es posible utilizar su forma para compararlos con imágenes de defectos típicos, almacenadas en lo que se suele denominar *Master set of samples*. Pueden utilizarse distintos algoritmos para determinar qué clase asignar a cada defecto, como algoritmos genéticos [Tang, 2004] o redes neuronales [Aborisade, 2009].

El principal problema que conlleva el uso de técnicas de visión por computador para realizar la detección y clasificación de defectos, es el tiempo de cómputo. Todas las tareas mencionadas anteriormente tienen que realizarse en tiempo real, por lo que los algoritmos que las lleven a cabo deben ejecutarse lo más rápido que sea posible. Conseguir que estas tareas de detección y clasificación puedan llevarse a cabo en el tiempo esperado, muchas veces se traduce en detecciones incorrectas, es decir, defectos no detectados, defectos clasificados con un tipo incorrecto, o defectos detectados en una posición o con unas dimensiones incorrectas.

En la figura 3.5 se muestran distintas detecciones de un defecto realizadas por un sistema comercial ampliamente utilizado a nivel mundial. Las imágenes se corresponden a varios defectos producidos por un mismo cilindro de trabajo durante la fase de laminación de una banda de acero. Al tratarse de defectos superficiales con exactamente la misma forma, lo esperable sería una misma detección y clasificación del mismo para todos los casos. Aunque en los casos (a) y (b) tanto la posición como el tamaño de cada defecto detectado son correctos, el sistema clasificó, en el segundo caso, el defecto incorrectamente como "pseudodefecto", mientras que el primero fue clasificado como "marca de cilindro". Los casos (c) y (d) tienen el tipo correcto ("marca de cilindro"), pero con dimensiones y posición incorrecta. En el caso (c) se puede apreciar como una pequeña

perturbación, como es la presencia de pequeños agujeros cercanos al defecto a analizar, es suficiente para hacer una detección incorrecta.

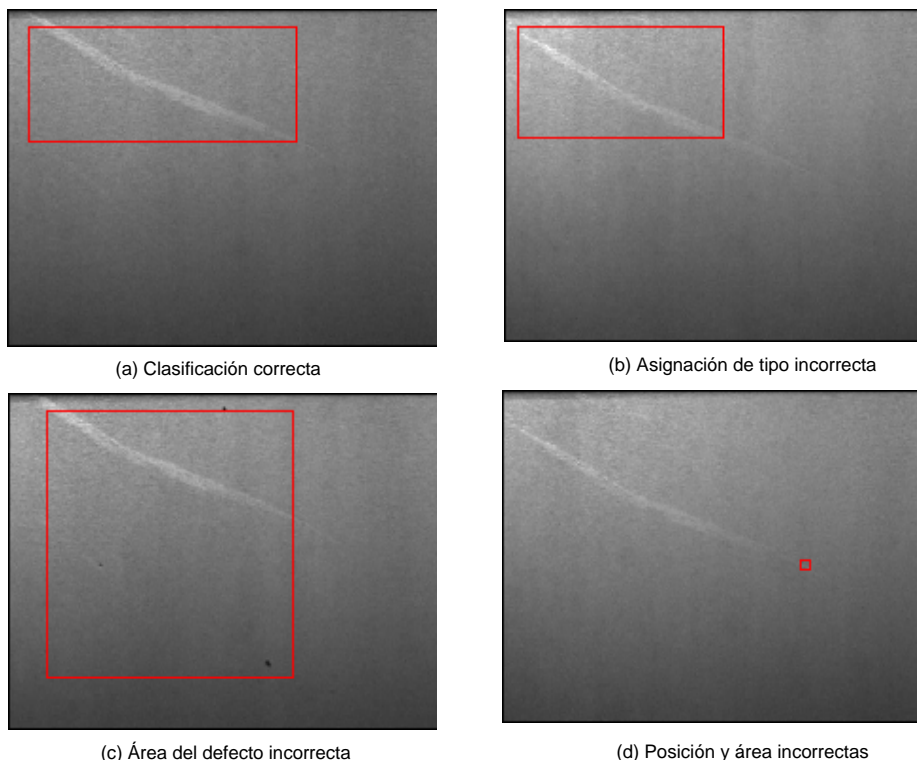


Figura 3.5: Detección de defectos

Los sistemas de detección de defectos basados en corrientes de Foucault tienen la ventaja de que la información que proporcionan es más precisa, aunque sea más escasa. Las líneas láser, ultrasonidos y rayos X son técnicas más caras y cuyas ventajas frente a los sistemas de visión por computador sólo son aprovechadas en ciertas aplicaciones concretas expuestas anteriormente. En el caso de la detección de defectos superficiales en bandas de acero esas ventajas resultan poco útiles, haciendo que su aplicación en este campo no sea adecuada. Además de esto, los sistemas de visión por computador pueden proporcionar de forma más precisa la posición y dimensiones de los defectos detectados, así como información adicional extraída de las imágenes tomadas, como puede ser el tipo de defecto detectado (suciedad, arañazo, agujero, etc.). Por estos motivos, este es el método más ampliamente utilizado en la industria para realizar la detección

de los defectos superficiales.

3.2. Clasificación de defectos

Una parte importante de la fase de inspección superficial reside en clasificar cada uno de los defectos como perteneciente a una determinada clase. En este campo concreto, las clases son los distintos tipos de defectos que pueden producirse durante la laminación: agujeros, arañazos, suciedad, etc. Esta tarea la realiza un clasificador que, en función de varias características de los defectos determina a qué clase pertenece. Las características pueden ser las obtenidas para cada defecto durante la fase de detección, como su posición, gravedad del defecto, dimensiones o relación entre longitud y anchura, entre otras (dependiendo del método de detección utilizado, las características obtenidas varían). Adicionalmente, puede realizarse un procesamiento de las imágenes obtenidas para obtener características adicionales, como puede ser la diferencia de nivel de gris entre los *pixels* del defecto y los *pixels* del fondo, el nivel de gris promedio o su varianza (entre otros).

Para que el resultado proporcionado por un clasificador de este tipo sea útil para la detección y caracterización de defectos periódicos se debe disponer de una clase adicional "defecto periódico" en la se que clasifique todos aquellos defectos individuales que hayan sido generados por los cilindros de trabajo del tren acabador. En el caso de estudio concreto de este trabajo se utilizarán los datos proporcionados por el sistema de visión por computador del sistema Parsytec, instalado en la factoría de Arcelor-Mittal de Avilés. Dicho sistema, además de detectar la posición y determinar las dimensiones de todos los defectos individuales, los clasifica. Concretamente, dispone de dos clases para clasificar los defectos individuales generados por cilindros de trabajo defectuosos: "Marcas de cilindro" y "Mosaico".

Para realizar esta tarea se pueden utilizar distintos algoritmos. En [Borselli *et al.*, 2011] se realiza una comparativa de ellos. Entre los estudios publicados recientemente, los algoritmos que se han utilizado con éxito en esta tarea son básicamente los algoritmos genéticos [M. Srinivas, 1994] (*Genetic Algorithms* o *GA*), redes neuronales (*Artificial Neural Networks* o *ANN*) y máquinas de vectores de soporte (*Support Vector Machines* o *SVM*), aunque estas dos últimos métodos han ofrecido mejores resultados que el primero. En [Zhenga *et al.*, 2002], publicado en 2002, se propone un método basado en algoritmos genéticos para inspeccionar superficies metálicas y clasificar sus defectos, pero la inmensa mayoría de las publicaciones sobre el tema posteriores a esa fecha utilizan redes neuronales o máquinas de vectores de soporte.

3.2.1. Redes neuronales

Las redes neuronales son un modelo computacional basado en el funcionamiento de las neuronas biológicas que poseen los animales [Lawrence, 1994]. Imitando el comportamiento de las neuronas biológicas, las neuronas artificiales pueden utilizarse como modo de almacenar conocimiento y como clasificadores. Del mismo modo que en una red neuronal biológica, las neuronas están conectadas entre ellas, teniendo cada conexión una fuerza o un peso distinto. Es precisamente en la distribución de dichos pesos donde realmente la red neuronal almacena el conocimiento adquirido. Este hecho hace imposible que un humano pueda interpretar el conocimiento que posee una red neuronal aunque conozca su estado interno. Los únicos datos que pueden extraerse de una red neuronal son los datos proporcionados por ésta ante las entradas que se le proporcionen. Tras un proceso de entrenamiento, en el que se establecen los pesos de cada conexión, una red neuronal es capaz de aprender a clasificar elementos que cumplen una determinada característica, o dicho de otro modo, son capaces de reconocer patrones [Bishop, 1995].

Aunque se han aplicado las redes neuronales para clasificar defectos detectados mediante corrientes de Foucault [Ewald y Stieper, 1996], en la mayoría de casos los datos provienen de sistemas de detección basados en visión por computador. En estos casos, se han utilizado las redes neuronales en ámbitos variados, desde la clasificación de defectos detectados en cuero [Kwak *et al.*, 2000], en barras de acero [Liu *et al.*, 2010] y en bandas de acero [Kang y Liu, 2005]. Este último caso de aplicación es en el que se han realizado un número mayor de investigaciones basadas en redes neuronales. Cabe destacar el artículo publicado por [Martins *et al.*, 2010] ya que realiza una clasificación de los defectos detectados en bandas de acero laminadas en una factoría de ArcelorMittal.

En todos los casos, los resultados obtenidos confirman que el uso de redes neuronales es apropiado para abordar el problema, ya que es capaz de trabajar con datos de entrada con ruido y proporcionar resultados en tiempo real.

3.2.2. Máquinas de vectores de soporte

Las máquinas de vectores de soporte son, como las redes neuronales, métodos de aprendizaje supervisado, es decir, aprenden a clasificar elementos en clases a partir de un conjunto de ejemplos. En dicho conjunto, cada elemento está previamente etiquetado como perteneciente a una determinada clase. Las máquinas de vectores de soporte representan cada elemento como un punto en un espacio de dimensión mayor, tratando de determinar el hiperplano o hiperplanos que separan los elementos de cada clase de forma óptima. De este modo, ante un nuevo elemento (representado igualmente por un punto en el espacio) puede determinarse a qué clase pertenece [Cristianini y Shawe-Taylor, 2005].

En general, la clasificación realizada por las máquinas de vectores de soporte es mejor que la realizada por redes neuronales (aunque hay problemas concretos donde las redes neuronales son más eficaces) [Kelemen *et al.*, 2002]. Las redes neuronales tienden a caer fácilmente en mínimos locales y el entrenamiento suele ser costoso. Sin embargo, el espacio de búsqueda de las máquinas de vectores de soporte tiene un único mínimo, haciendo imposible caer en mínimos locales y el entrenamiento es menos costoso. Mientras que el objetivo de las redes neuronales es minimizar el error de la clasificación de la fase de entrenamiento, las máquinas de vectores de soporte tratan de minimizar el límite superior del error de generalización. Este límite superior representa el error que puede obtenerse en la clasificación de los elementos no utilizados previamente por el clasificador. Por este motivo, el grado de generalización de las máquinas de vectores de soporte es superior al de las redes neuronales. Además, el uso de máquinas de vectores de soporte es muy eficiente para resolver este problema ya que es capaz de proporcionar buenos resultados incluso para datos de entrada con mucho ruido, puede proporcionar resultados en tiempo real y es escalable, es decir, pueden añadirse nuevas clases (tipos de defecto), sin falta de volver a realizar la fase de entrenamiento completa [Jia *et al.*, 2004].

Ejemplos del uso de máquinas de vectores de soporte al problema de clasificación de defectos en bandas de acero pueden verse en [Choi *et al.*, 2006] y [Wang *et al.*, 2007]. También se ha utilizado para clasificar defectos en metales muy reflectantes [Zhang *et al.*, 2011] y en tela [Ghosh *et al.*, 2011].

Es interesante destacar el trabajo propuesto por [Ruiyu *et al.*, 2008], donde combinan ambas técnicas para realizar la clasificación de defectos. La idea principal de este trabajo reside en diseñar un clasificador que cuente con las ventajas de las redes neuronales pero minimizando uno de sus principales inconvenientes: el coste de entrenamiento de la red. Este trabajo propone utilizar una red neuronal para la cual los pesos iniciales de cada conexión neuronal son determinados mediante una máquina de vectores de soporte. De este modo se obtiene una red neuronal mejorada capaz de clasificar eficientemente defectos entre una gran variedad de clases diferentes, en tiempo real y con un coste de entrenamiento inferior.

3.3. Agrupación de defectos individuales en defectos periódicos

La literatura científica relativa a la agrupación de defectos superficiales en defectos periódicos disponible actualmente es muy escasa. Los estudios realizados durante los últimos años sobre distintas técnicas de detección y clasificación de defectos superficiales tenían siempre presente el tiempo disponible para realizar

todas las tareas. Tradicionalmente, siempre se proporcionaba toda la información generada en tiempo real a los operadores encargados de supervisar los elementos producidos, para que éstos pudiesen reaccionar ante cualquier imprevisto lo antes posible. En estos casos se descartaba la posibilidad de procesar *offline* toda la información obtenida durante el proceso de producción, y la menor potencia de los computadores con respecto a los disponibles en la actualidad, dejaban esta tarea en un segundo plano.

A continuación se describen las técnicas publicadas para la detección de defectos periódicos. Aunque en la mayoría de los casos se realiza en base a una previa detección de los defectos individuales mediante visión por computador, en algunos casos esta detección es realizada utilizando corrientes de Foucault.

3.3.1. Corriente de Foucault

Los sistemas de inspección superficial basados en la corriente de Foucault, tienen la ventaja de proporcionar la posición de los defectos de forma más precisa. Si la distancia que separa a dos defectos consecutivos que constituyen parte del mismo defecto periódico es constante, se puede utilizar una transformada de Fourier para detectar dichas periodicidades. Si la distancia que separa a dos defectos consecutivos no fuese constante, el uso de la transformada de Fourier sería menos eficiente.

En [Park *et al.*, 2010] se realizó la detección de defectos periódicos en varillas de alambre. Como se ha comentado en la sección anterior, uno de los mayores problemas de detectar los defectos individuales utilizando corrientes de Foucault, es la escasa información que proporciona sobre los defectos. Para disminuir este problema, utilizaron cámaras CCD para tomar imágenes de aquellos defectos con mayor probabilidad de constituir un defecto periódico. Descubrieron empíricamente, que la mayoría de los defectos que se repiten periódicamente en la fabricación de varillas de alambre están provocados por los cilindros de trabajo y siempre forman defectos con una forma muy similar, por lo que son fácilmente detectables. Utilizando wavelets estáticos, se puede mejorar la relación señal ruido de estas imágenes antes de ser umbralizadas [Shensa, 1992]. Partiendo de la posición de aquellos defectos cuya imagen se corresponde con una marca de cilindro, es fácilmente aplicable una transformada de Fourier para determinar cuáles forman parte del defecto periódico y cuál es su periodo.

Esta misma técnica, no es aplicable en el caso de utilizar planchas en lugar de alambres [Sáinz, 2009], ya que el número de defectos detectados es mucho mayor. Además, al tener que utilizar únicamente técnicas de visión por computador para determinar la posición y dimensiones de los defectos, la poca precisión disponible sobre su ubicación en la plancha dificulta la posibilidad de utilizar la transformada de Fourier.

Por último, debido a que los defectos periódicos provocados por cilindros de

trabajo en el caso de planchas pueden tener formas muy diversas, como se ve en la figura 3.6, saber de antemano cuáles pueden haber sido provocados de este modo es más complicado que en el caso de alambres.

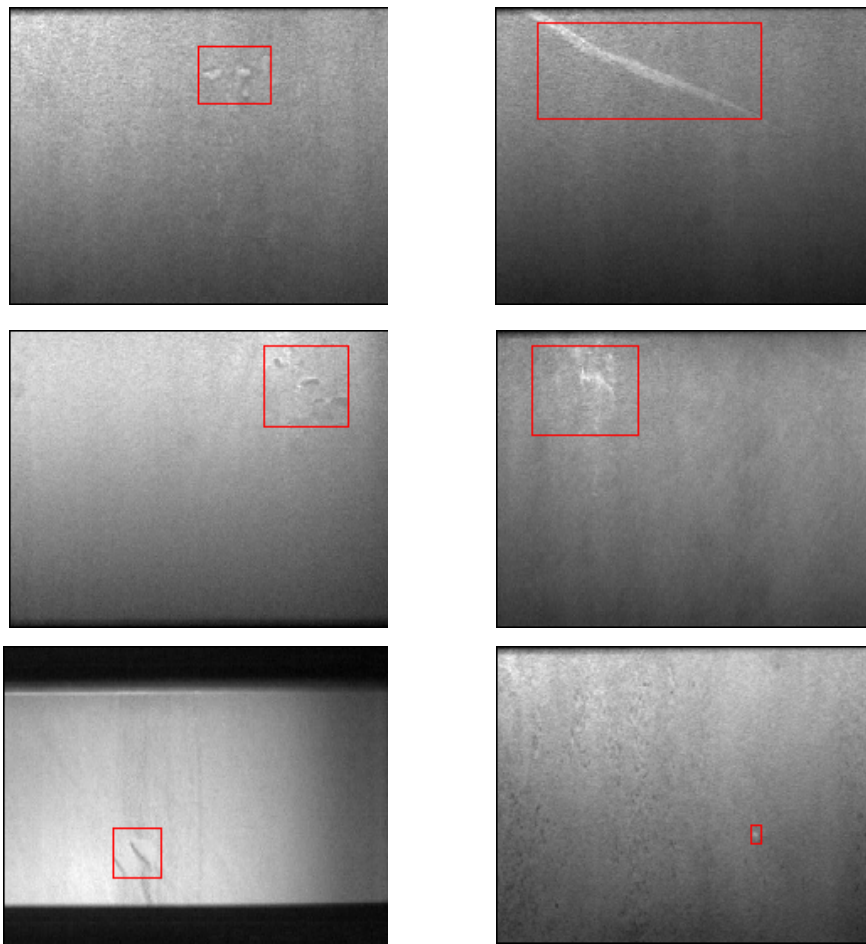


Figura 3.6: Distintos tipos de defectos periódicos en planchas de acero

3.3.2. Visión por computador

Aunque existan algunos sistemas comerciales que realizan la detección de defectos periódicos basándose únicamente en técnicas de visión por computador

para la detección de los defectos superficiales, las técnicas utilizadas por éstos no han sido publicadas. Asimismo, la literatura científica disponible sobre este tipo de técnicas es prácticamente inexistente.

Para poder determinar qué defectos superficiales forman un defecto periódico, se dispone de la posición, dimensiones y tipo de cada uno de los defectos (aunque sean datos poco precisos). Al no ser aplicable en este caso la transformada de Fourier, no puede determinarse por este método la periodicidad de los defectos periódicos que hubiese. Para poder determinar dicho periodo (dato que facilitaría el proceso), se puede utilizar una técnica como la descrita en [Zhao *et al.*, 2009]. Conociendo el radio y la separación de cada par de cilindros de trabajo (los que provocan defectos periódicos), es posible determinar qué distancia habrá entre dos defectos superficiales consecutivos y pertenecientes a un mismo defecto periódico. Basándonos en la idea de que el volumen de acero antes y después de pasar por los cilindros de trabajo de una caja de laminación ha de ser el mismo, y que al laminarlo éste se estira en la dirección de avance de la banda y no hacia los lados, puede determinarse el periodo con un cálculo sencillo.

Como muestra la figura 3.7, si un cilindro defectuoso genera marcas periódicas de periodo L ($L = 2 \pi \cdot \text{radio del cilindro}$), y éste está separado una distancia S del otro cilindro de trabajo de su misma caja, al ser laminados por la siguiente, compuesta por dos cilindros de trabajo separados una distancia, por ejemplo, $S/2$, la separación de esos dos defectos superficiales aumentará a $2L$.

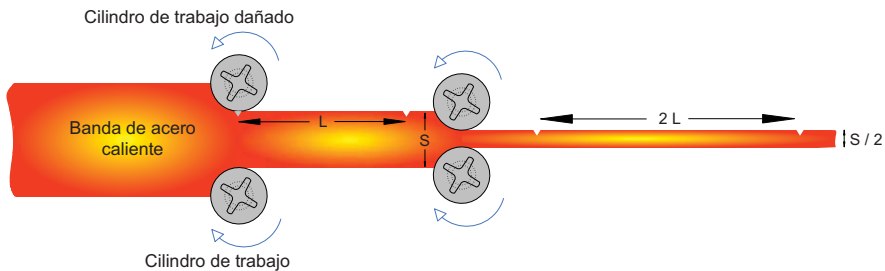


Figura 3.7: Determinación del periodo de un defecto periódico

Como en un caso real, el tren de laminación no se compondrá de un sólo par de cilindros, si no de varios pares de cilindros, es necesario disponer de una fórmula general que permita obtener el periodo teórico de los posibles defectos periódicos que pueda generar cada uno de ellos. Supongamos que se tienen n cajas de cilindros. Al periodo de los defectos periódicos generados por un cilindro de trabajo también recibe el nombre de *desarrollo* de dicho cilindro.

Denominamos r_i al radio del cilindro i -ésimo, y h_i al espesor de la banda tras pasar por el cilindro i -ésimo como se ilustra en la figura 3.8.

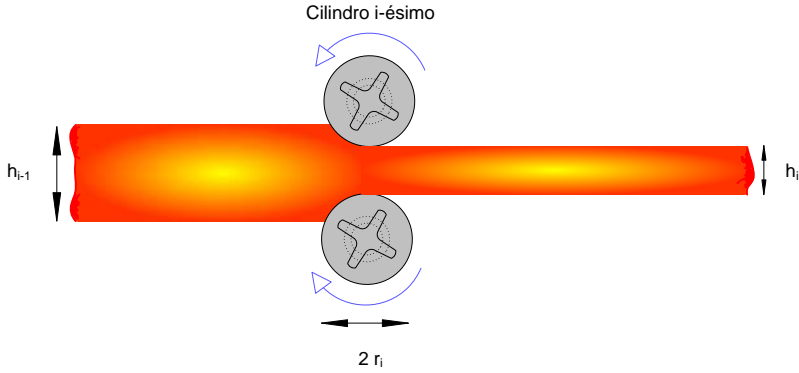


Figura 3.8: Cálculo de la periodicidad teórica

De este modo, puede definirse la reducción de la i -ésima caja de cilindros, b_i , como la relación entre la diferencia de los espesores de entrada y salida de la banda al pasar a su través y el espesor de entrada.

$$b_i = \frac{h_{i-1} - h_i}{h_{i-1}} \quad (3.1)$$

Si tomamos L_i como una longitud de referencia igual a la separación existente entre dos defectos superficiales después de pasar por la i -ésima caja de cilindros, teniendo en cuenta que el volumen de acero es constante y éste no se estira hacia los lados, tiene que cumplirse la igualdad (3.2).

$$L_{i-1} h_{i-1} = L_i h_i \quad (3.2)$$

o expresado de otra forma,

$$L_i = L_{i-1} \frac{h_{i-1}}{h_i} \quad (3.3)$$

El cociente de la parte derecha de la igualdad (3.3) puede expresarse en función de la reducción de su correspondiente caja. A partir de la igualdad (3.1) se obtiene lo siguiente:

$$b_i = \frac{h_{i-1}}{h_{i-1}} - \frac{h_i}{h_{i-1}} = 1 - \frac{h_i}{h_{i-1}} \quad (3.4)$$

$$\frac{h_i}{h_{i-1}} = 1 - b_i \quad (3.5)$$

$$\frac{h_{i-1}}{h_i} = \frac{1}{1 - b_i} \quad (3.6)$$

Combinando (3.3) y (3.6) se obtiene

$$L_i = L_{i-1} \frac{1}{1 - b_i} \quad (3.7)$$

Es decir, conociendo la separación entre dos defectos superficiales antes de pasar por la caja i -ésima, se puede determinar cuál será su separación después de atravesarla multiplicándola por $\frac{1}{1-b_i}$. Como el resultado de este producto será la separación entre los defectos antes de entrar por la caja $i+1$, multiplicándolo por $\frac{1}{1-b_{i+1}}$ calcularíamos su separación después de atravesar esa caja. Para obtener la separación final de ese par de defectos, se procedería del mismo modo hasta llegar a la última caja. Es decir, la separación final L_f puede determinarse mediante (3.8).

$$L_f = L_i \prod_{j=i+1}^n \frac{1}{1 - b_j} \quad (3.8)$$

Como la separación entre dos defectos producidos por el cilindro i tiene que coincidir con su perímetro, y ésta será su separación antes de entrar por la caja $i+1$, puede utilizarse la ecuación (3.9) para determinar la periodicidad teórica p_i de la i -ésima caja de cilindros.

$$p_i = 2\pi r_i \prod_{j=i+1}^n \frac{1}{1 - b_j} \quad (3.9)$$

Como siempre se dispondrá del radio de todos los cilindros, así como de la separación entre cada par, puede calcularse el periodo que tendría un conjunto de defectos producidos de forma periódica por los cilindros de trabajo de cada caja. Teniendo en cuenta que al pasar entre dos cilindros de trabajo el acero puede deslizarse, y que se podría expandir en pequeña medida hacia los lados, en ocasiones el valor obtenido utilizando esta técnica podría no ser del todo exacto, aunque sí una buena aproximación. Con este dato, podría aplicarse alguna técnica de *clustering* [Xu y Wunsch, 2005], imponiendo como restricción que la separación entre dos defectos del *cluster* coincida con un múltiplo de esa periodicidad teórica.

3.4. Sistemas Comerciales de inspección

Actualmente hay una gran cantidad de empresas dedicadas al desarrollo y comercialización de sistemas de inspección superficial de metales durante su proceso de laminación. A continuación se enumeran algunas de las más importantes.

3.4.1. AMEPA

Desarrolla sistemas de inspección online sin contacto. Utiliza un conjunto de características para la inspección que son independientes del material inspeccionado. Utiliza corrientes de Foucault para detectar escoria y residuos. Utiliza líneas láser y visión por computador (con cámaras CCD) para medir la rugosidad superficial mediante técnicas de triangulación [AMEPA, 2010].

3.4.2. Andec Manufacturing

Fabrica sistemas de inspección de metales laminados (como bandas, chapas, alambres, varillas o barras) y de otros tipos de materiales, como hormigón o madera. Para la detección de defectos superficiales en metal utiliza corrientes de Foucault, y un sistema de ultrasonidos para la detección de defectos no superficiales [ANDEC, 2010].

3.4.3. Cognex SIS

Es uno de los sistemas más extendidos, con una importante presencia en plantas industriales de materiales laminados (no sólo metales, si no también plásticos, telas y papel). Utiliza un sistema patentado para la detección *online* mediante sistemas de visión por computador. Además de detectar los defectos superficiales, los clasifica en distintos tipos. Mediante el *software* de inspección disponible, los operadores de la planta pueden ver las imágenes de cada uno de los defectos clasificados anteriormente. Aquellos defectos de tipo "marca de cilindro" que se repitan son etiquetados como parte de un defecto periódico [COGNEX, 2010].

3.4.4. DSI Plus

Es un sistema de detección de defectos basado en técnicas de visión por computador. Capta imágenes de los defectos mediante cámaras CCD y CMOS. Además de las cámaras, inspecciona la superficie de los materiales laminados mediante distintos tipos de sensores sin contacto (sensores de barrera, triangulación activa

o holografía conoscópica) y termografía infrarroja. Toda la inspección se realiza *online*. También permite clasificar los defectos en distintos tipos [DSIPLUS, 2010].

3.4.5. ISRA Vision

Inspecciona una gran variedad de superficies, como metales, cristal, papel, así como superficies impresas o barnizadas. Realiza la inspección de metales *online* utilizando sistemas de visión por computador. Clasifica los defectos detectados en tipos, entre los cuales está el tipo "marca de cilindro". Detecta aquellos defectos de este último tipo que se repiten periódicamente, dando aviso de la presencia de defectos periódicos [ISRAVISION, 2010].

3.4.6. Lismar

Realiza la inspección, principalmente, de acero y aluminio. Utiliza corrientes de Foucault para detectar los defectos superficiales y ultrasonidos para detectar defectos no-superficiales. Sólo diferencia dos tipos de defectos, las grietas y los arañazos, por lo que no puede detectar defectos periódicos [LISMAR, 2010].

3.4.7. Marktec

Dispone de una amplia gama de detección de defectos superficiales. Además de los típicos sistemas sin contacto, también dispone de sistemas de detección no invasivos con contacto (aplicación de líquidos coloreados que resaltan la presencia de defectos). La detección *online* de defectos sin contacto es realizada mediante sensores de corrientes de Foucault y ultrasonidos [MARKTEC, 2010].

3.4.8. Parsytec

Es el sistema de inspección más utilizado a nivel mundial. Realiza la inspección superficial *online* utilizando sistemas de visión por computador con cámaras CCD. Clasifica todos los defectos encontrados en tipos. Los defectos de tipo "marcas de cilindro" pueden ser etiquetados como periódicos si se producen repetidamente [PARSYTEC, 2010].

3.4.9. Sarclad

Efectúa la detección de defectos superficiales utilizando corrientes de Foucault y defectos no superficiales mediante ultrasonidos. Sólo clasifica defectos como grietas o arañazos. No realiza clasificación de defectos periódicos [SARCLAD, 2010].

3.4.10. Struck

Realiza inspección superficial *online* de acero y aluminio utilizando sistemas de visión por computador. Dispone de un sistema de detección de defectos periódicos producidos por cilindros de trabajo defectuosos. Cuando éstos son detectados, informa inmediatamente del problema mediante una alarma [STRUCK, 2010].

3.5. Conclusiones y motivación

En la tabla 3.1 se recogen las características de cada uno de los métodos de detección de defectos superficiales descritos anteriormente. De todas ellas, la más idónea para ser aplicada al problema de la detección y caracterización de defectos periódicos es la visión por computador, al ofrecer información sobre posición y características de los defectos a un coste bajo. De hecho, es la única técnica utilizada en la literatura científica y en los sistemas comerciales para la detección de defectos periódicos en bandas de acero (las corrientes de Foucault también son aplicables para la detección de defectos periódicos, pero sólo con alambres y barras).

Existen varias técnicas diferentes para llevar a cabo las dos primeras de las tres tareas que son necesarias para poder detectar y caracterizar los defectos periódicos (detección de defectos individuales, clasificación de defectos individuales y agrupación de defectos individuales en defectos periódicos). En realidad, se pueden encontrar en la literatura científica algunas otras técnicas además de las descritas en el presente capítulo, pero su aplicación real es minoritaria. En cambio, las investigaciones publicadas respecto a la agrupación de los defectos individuales en defectos periódicos es muy escasa, especialmente en el caso de la laminación de bandas de acero. Este hecho es el que ha servido como motivación de la presente tesis, que pretende completar la investigación realizada en este campo y servir como base para investigaciones futuras.

Tabla 3.1: Características de los métodos de detección

| Técnica de detección | Posición detectada | Características detectadas | Coste | Materiales utilizables | Detección de defectos internos | Otros |
|------------------------|--------------------|----------------------------|-------|------------------------|--------------------------------|---|
| Corrientes de Foucault | Sí | No | Bajo | Metálicos | No | Bueno para la detección de defectos en barras |
| Líneas Láser | Sí | Sí | Alto | Todos | No | Alta resolución Calibración frecuente |
| Ultrasonidos | Sí | No | Alto | Todos | Sí | Datos con ruido |
| Rayos X | Sí | No | Alto | Todos | Sí | Datos con ruido |
| Visión por computador | Sí | Sí | Bajo | Todos | No | |

Capítulo 4

Clasificación Manual

El objetivo de esta investigación es conseguir desarrollar una técnica capaz de agrupar todos aquellos defectos individuales que se hayan generado de forma periódica por un cilindro de trabajo defectuoso. Si se desean probar distintas técnicas para averiguar cuál de ellas funciona mejor, o incluso compararlas con el sistema Parsytec, que está funcionando actualmente, para comprobar si se produce alguna mejoría, es necesario tener una referencia o, dicho de otro modo, una agrupación de los defectos individuales lo más perfecta posible. Dicha agrupación perfecta, habitualmente denominada *ground truth* será el objetivo de cualquier algoritmo de agrupación de defectos. Además de servir para comparar dos técnicas distintas, también puede ser utilizado para la fase de entrenamiento de una herramienta.

Aunque se puede disponer de una gran cantidad de bandas reales con sus respectivos defectos superficiales detectados, la única agrupación en defectos periódicos disponible es la realizada por el sistema Parsytec. No se dispone de ninguna agrupación realizada de forma manual por un usuario experto que pueda ser utilizada como referencia para la fase de entrenamiento y pruebas de la herramienta a desarrollar. En este capítulo se presenta el modo en que se ha solucionado inicialmente este problema, realizando una agrupación manual de los defectos individuales con la ayuda de la información recogida por el sistema Parsytec durante la fase de detección de defectos superficiales.

4.1. Punto de partida

Para realizar las tareas de entrenamiento y test de una determinada técnica o herramienta, es preciso disponer de un conjunto de bandas con una agrupación de defectos periódicos perfecta. En este punto surge la primera disyuntiva: crear bandas sintéticas o utilizar bandas reales. Ambas opciones tienen sus ventajas y sus inconvenientes. La ventaja de utilizar bandas sintéticas es que la agrupación de defectos periódicos se obtiene a la vez que se crea la banda. Dicha agrupación es incuestionablemente perfecta, y se puede conseguir en un tiempo relativamente corto. Su inconveniente es que generar bandas sintéticas representativas de

las bandas reales es un proceso largo y complejo. Este inconveniente se torna ventaja con el uso de bandas reales. La representatividad de las bandas reales es completa, pero es más complicado obtener una detección de defectos periódicos perfecta a partir de ellas, sobre todo teniendo en cuenta que no se dispone de un usuario experto en realizar este tipo de tareas. Sin embargo, para lograr los mejores resultados en las fases de entrenamiento que se tengan que realizar, es imprescindible contar con un conjunto de bandas de entrenamiento lo más representativo posible. Por ello habrá que desarrollar alguna técnica para lograr una clasificación lo más perfecta posible en bandas de acero reales.

Puesto que la planta de Arcelor-Mittal de Avilés ya cuenta con un sistema de inspección instalado, la información recogida por éste puede ser utilizada como punto de partida para obtener un *ground truth* representativo de la realidad. Este sistema se encarga de inspeccionar el 100 % de las dos superficies (superior e inferior) de cada banda durante su laminación. El sistema tiene integrado un módulo de procesamiento de imágenes que detecta defectos sobre su superficie. Cuando un defecto es detectado, se guarda su imagen en una base de datos junto con una serie de datos característicos del mismo (anchura, altura, posición, etc.) y se le asigna un tipo de defecto. En la figura 4.1 se muestra un esquema con todos los componentes del sistema Parsytec. A la izquierda se muestra la banda de acero pasando por un camino de rodillos en el momento en que sus superficies son inspeccionadas por un conjunto de cámaras (actualmente, se utilizan 10 cámaras, 5 por superficie). La información tomada por las cámaras es analizada y almacenada en los ordenadores, que pueden ser consultados posteriormente por terminales de usuario.

Las zonas inspeccionadas por cada una de las cámaras están solapadas, como se muestra en la figura 4.2. De este modo se asegura que el 100 % de la superficie de la banda sea inspeccionada por el sistema.

Además, esto permite unir defectos que, o bien porque sean muy grandes o bien porque estén situados en los bordes de imágenes adyacentes, aparecen dispersos en distintas imágenes. En la figura 4.3 se muestran distintos defectos detectados por varias cámaras en instantes consecutivos (cada número corresponde al identificador de la cámara que capta la imagen; el subíndice indica el número de imagen dentro del conjunto de todas las imágenes tomadas por una misma cámara).

El interés que tiene tomar imágenes solapadas es poder unir distintos trozos de un mismo defecto en uno sólo. Como muestra la figura 4.3, un mismo defecto puede ocupar la región de inspección de dos cámaras distintas al mismo tiempo (como ocurre con las imágenes 21 de las cámaras 3 y 4) o aparecer capturada por la misma cámara en dos fotografías consecutivas (como ocurre con las imágenes 20 y 21 de la cámara 3). También podría darse el caso de defectos más grandes que fueran captados en dos (o más) imágenes consecutivas de más de una cámara.

Sea como sea el defecto, el sistema es capaz de detectar sus diferentes partes

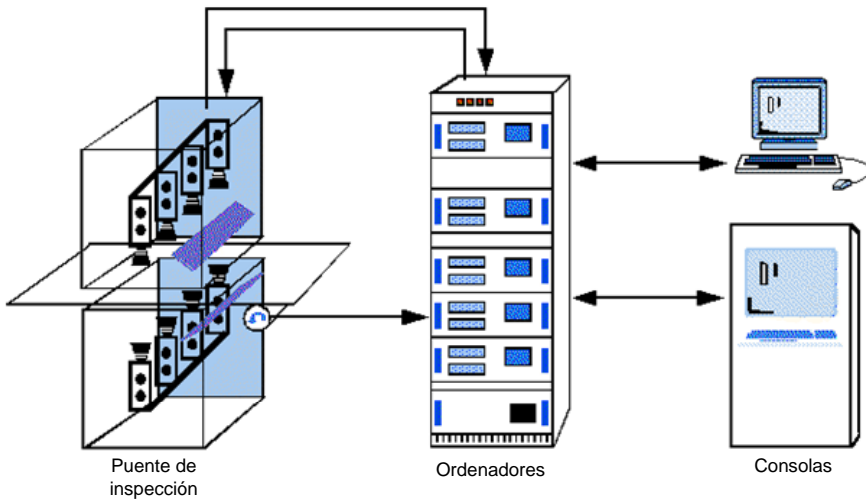


Figura 4.1: Componentes del sistema Parsytec

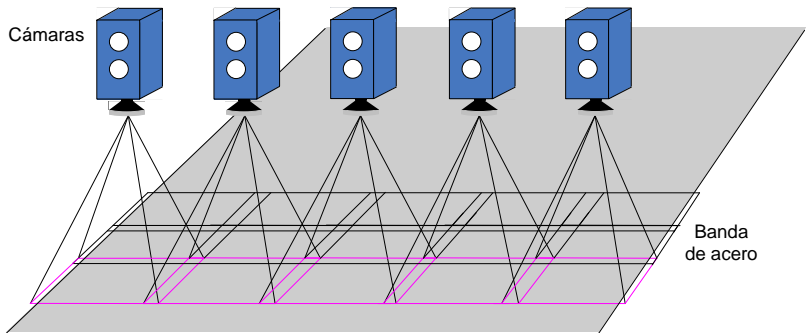


Figura 4.2: Captura de imágenes con solapamiento

en imágenes adyacentes y almacenarlo en la base de datos como un defecto único, evitando almacenar defectos repetidos. Esto puede suceder cuando un defecto aparece de forma íntegra en dos imágenes diferentes, como ocurre en las imágenes 21 de las cámaras 2 y 3 de la figura 4.3. Además de detectar los defectos y asignarles un tipo, también etiqueta como pertenecientes a un defecto periódico aquellos defectos individuales que haya determinado que se repiten

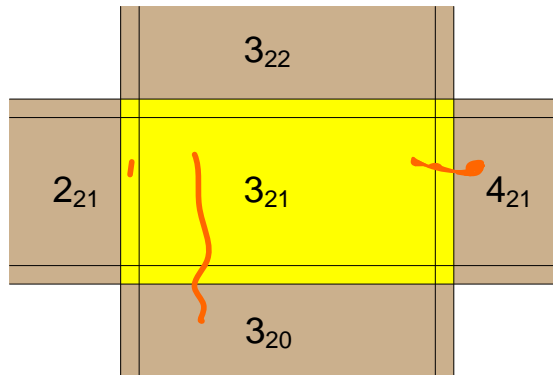


Figura 4.3: Unión de distintas partes de un mismo defecto

periódicamente.

Aunque el sistema Parsytec es muy potente y útil a la hora de inspeccionar la superficie de las bandas de acero presenta un problema importante, y es que realiza las tareas descritas anteriormente *online*, es decir, durante la laminación de la banda. Esto quiere decir que dispone de muy poco tiempo para procesar las imágenes capturadas por las 10 cámaras, asignar un tipo a cada defecto, inspeccionar qué defectos de los detectados anteriormente deben ser unidos en uno solo, y comprobar si deben ser agrupados dentro de algún defecto periódico creado previamente. Esto obliga a utilizar técnicas que realicen estas tareas en un corto período de tiempo, lo que muchas veces conduce a error o resultados poco precisos, tanto a la hora de procesar las imágenes y detectar defectos en ellas, como a la hora de agrupar distintos defectos individuales dentro de un mismo defecto periódico.

Toda esta información calculada *online* estará disponible al finalizar la laminación de cada banda en una base de datos, por lo que puede ser utilizada para realizar un procesamiento *offline* (después de la laminación de la banda) que haga una nueva agrupación de defectos individuales en periódicos. Además, también se conoce el periodo que deberían tener los defectos periódicos generados por cada uno de los cilindros de trabajo, calculado del modo descrito en la sección 3.3.

Como se comentó en la sección 3.1, las imágenes de los defectos se pueden utilizar para asignarles un tipo en función de su morfología. Se supone que todos los defectos individuales generados de forma periódica por un mismo cilindro de trabajo tienen que tener la misma forma y, por tanto, se les asignará el mismo tipo. Esto puede suponer una ayuda importante a la hora de realizar una agrupación de defectos periódicos, ya que la búsqueda puede reducirse agrupando

sólo aquellos defectos que hayan sido etiquetados con el mismo tipo. Además, según el personal del departamento técnico de calidad de la planta de Arcelor-Mittal de Avilés, los defectos individuales pertenecientes a defectos periódicos siempre son clasificados por el sistema Parsytec como de tipo "Marca de cilindro" o "Mosaico".

Por tanto, para realizar una clasificación manual se pueden utilizar bandas reales para las cuales se dispone de la siguiente información para cada defecto individual:

- Coordenadas (transversal y longitudinal)
- Dimensiones (ancho y largo)
- Tipo
- Imagen

Y además se dispone de una agrupación en defectos periódicos que puede servir como punto de partida para una agrupación más completa. Tan sólo habría que buscar defectos del mismo tipo y morfología que estén separados dos a dos por el mismo periodo calculado por el sistema Parsytec. Además, el periodo teórico de cada caja de cilindros se puede utilizar para buscar defectos periódicos no detectados.

4.2. Clasificación

Para realizar la clasificación manual de las bandas, se utilizará la información descrita en la sección anterior recogida en una base de datos de *Microsoft Access*. Por desgracia, es muy difícil analizar esta información directamente de las tablas generadas como respuesta a una consulta de la base de datos. Tratar de buscar defectos cuya posición encaje dentro de una secuencia periódica trabajando directamente con una tabla de resultados como la de la figura 4.4 no es factible. Una solución relativamente simple a este problema sería utilizar una herramienta que visualice los datos presentados en dicha tabla tomando los valores de las columnas *PositionCD* y *PositionMD* como las coordenadas transversal y longitudinal de cada defecto respectivamente y los valores de las columnas *SizeCD* y *SizeMD* como su ancho y largo respectivamente, resultando una bobina de papel como la de la figura 4.5.

Además, como se conoce la periodicidad teórica de cada caja de cilindros, se puede imprimir en un plástico transparente una rejilla con la separación que deberían tener dos defectos individuales consecutivos generados por cada una de ellas (ver figura 4.6).

| DefectId | Class | PositionCD | PositionMD | SizeCD | SizeMD |
|----------|-------|------------|------------|--------|--------|
| 55 | 0 | 682 | 413 | 14 | 7 |
| 75 | 0 | 909 | 867 | 29 | 16 |
| 49 | 0 | 506 | 898 | 94 | 124 |
| 47 | 13 | 506 | 898 | 144 | 124 |
| 48 | 13 | 627 | 909 | 22 | 13 |
| 65 | 13 | 404 | 1018 | 500 | 519 |
| 25 | 0 | 466 | 1035 | 7 | 6 |
| 74 | 0 | 880 | 1156 | 6 | 7 |
| 11 | 0 | 454 | 1352 | 33 | 12 |
| 72 | 13 | 765 | 1352 | 139 | 99 |

Figura 4.4: Datos de los defectos de una banda de acero



Figura 4.5: Representación de los defectos de una banda de acero

Superponiendo la rejilla al papel, se puede comprobar fácilmente si la separación existente entre dos defectos cualesquiera de la banda es igual a la periodicidad teórica de una caja de cilindros. En la figura 4.7 se muestra una sucesión de defectos individuales correspondientes a un defecto periódico. La separación entre ellos coincide exactamente con el periodo teórico de una de las cajas de cilindros que laminaron la banda. A todos estos defectos individuales se les ha marcado como pertenecientes al mismo defecto periódico, rodeándolos con una elipse verde. El resto de defectos individuales de la figura rodeados con elipses de distintos colores se corresponden a defectos individuales de defectos periódicos parciales.

Aunque este sistema pueda utilizarse para crear el *ground truth* de un conjunto de bandas, es muy laborioso y es muy fácil cometer errores. Además, se tendría en cuenta solamente la posición de cada uno de los defectos para realizar la

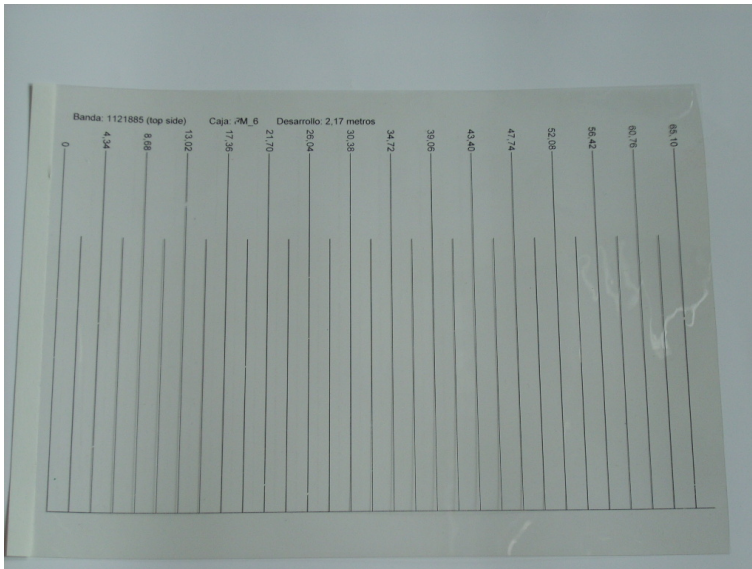


Figura 4.6: Rejilla de periodicidad teórica

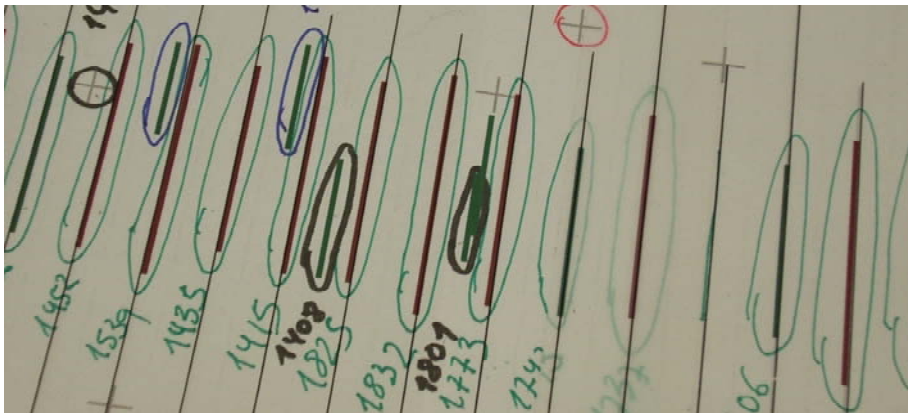


Figura 4.7: Clasificación manual mediante banda impresa

agrupación, ignorando la morfología de los defectos. Teniendo en cuenta que los sistemas de inspección superficial basados en visión por computador suelen proporcionar información poco precisa, como se comenta en la sección 3.1.5, se debería otorgar más importancia a la morfología de los defectos que a su posición

y dimensiones. Por tanto, para poder conseguir un *ground truth* lo más perfecto posible, es imprescindible crear una herramienta que proporcione la mayor ayuda posible para realizar esta tarea.

4.3. Herramienta de ayuda a la clasificación manual

Disponer de una herramienta que permita realizar, de una forma sencilla, una agrupación de defectos periódicos manualmente, permitiría crear un *ground truth* representativo en poco tiempo. Además, contar con una herramienta de apoyo que ayude a realizar esta tarea, reduciría en gran medida el número de errores que se podrían cometer utilizando un método como el expuesto en la sección 4.2. A continuación se enumeran las funcionalidades que debe tener esta herramienta, así como el modo en que éstas fueron desarrolladas finalmente.

4.3.1. Requisitos

Las funcionalidades a implementar se pueden clasificar en tres bloques: manejo de datos de entrada y salida, visualización de defectos y herramientas de clasificación.

En relación con el manejo de datos de entrada y salida, deben cumplirse los siguientes requisitos:

- Leer los datos de los defectos directamente desde una base de datos creada previamente
- Elegir de qué base de datos se va a leer. Se debe ofrecer la posibilidad de elegir la banda y superficie sobre la que trabajar.
- Los cambios realizados durante la sesión de trabajo no deben alterar la base de datos de entrada que se haya seleccionado. Todos estos cambios deben reflejarse en una base de datos independiente. El nombre y la ubicación de esta base de datos podrá ser elegida por el usuario.

El modo en que se muestre al usuario toda la información recogida en la base de datos es un aspecto clave para que el producto *software* final sea efectivo y sencillo de utilizar. Con este fin, se deben cumplir los siguientes puntos:

- El modo en que se muestre la banda debe ser similar a lo representado en la figura 2.4, donde la banda se ilustra como un rectángulo. La posición vertical de un defecto dibujado dentro de dicho rectángulo variará según su posición transversal en la banda, y la posición horizontal en función de

su posición longitudinal. En lo sucesivo, a este rectángulo se le denominará *mapa de defectos*.

- Los defectos se representarán como rectángulos, cuyas dimensiones se corresponderán al alto y ancho de cada defecto.
- Para poder visualizar aquellos defectos de dimensiones reducidas, se deberá poder variar el nivel de *zoom*. Si, según el nivel de *zoom* elegido por el usuario, la banda completa no cupiese en su ventana, el usuario tiene que disponer de la posibilidad de acceder a cualquier posición de la banda, mediante barras de *scroll*.
- Debido a que, en ocasiones, la densidad de defectos puede ser muy alta, y teniendo en cuenta que la mayoría de los defectos periódicos son clasificados como de tipo "Marcas de cilindro" o "Mosaico", debe ofrecerse la posibilidad de representar, o bien todos los defectos, o bien sólo los tipos "Marcas de cilindro" y "Mosaico".
- Para poder tomar como punto de partida la clasificación de defectos periódicos realizada previamente por el sistema Parsytec, el programa debe señalar qué defectos han sido etiquetados como parte de un defecto periódico en la base de datos de entrada, por ejemplo, representándolos de un color distinto al resto de defectos.
- En cualquier instante, el usuario debe poder conocer las siguientes características de cualquier defecto individual: posición (transversal y longitudinal), dimensiones (anchura y longitud), tipo y el identificador que se le ha asignado en la base de datos.
- Para poder realizar una clasificación en base a la morfología de los defectos, la herramienta debe mostrar en una ventana las imágenes de éstos (cuando estén disponibles). Además, puesto que en la misma imagen puede haber dos o más defectos, la herramienta tiene que identificar al defecto seleccionado dentro de la imagen.

En lo que se refiere al uso de la información mostrada al usuario, y para que éste pueda realizar una clasificación correcta, la herramienta debería permitir lo siguiente:

- Mostrar, sobre el mapa de defectos, la separación que deberían tener dos defectos individuales si formaran parte de un defecto periódico generado por un cilindro determinado, utilizando su periodo teórico. El usuario tiene que poder elegir el cilindro en cuestión.

- Puesto que en ocasiones el periodo teórico de los cilindros no es muy preciso, el usuario debe poder corregirlo, modificando la separación mostrada por la herramienta para dos defectos consecutivos de un mismo defecto periódico. Los defectos individuales que se integren en un defecto periódico en estos casos, serán guardados en la base de datos de salida con el periodo modificado por el usuario.
- Mostrar, sobre el mapa de defectos, una línea que determine una posición transversal. Serviría para que el usuario compruebe que un conjunto de defectos individuales comparten posición transversal.
- El usuario tiene que poder eliminar la caracterización de los defectos periódicos de la banda seleccionada o de la base de datos completa.
- Para que el usuario sepa qué defectos han sido incluidos hasta un determinado instante en el *ground truth*, éstos deben estar pintados en otro color o resaltados de algún modo.
- Los defectos que seleccione el usuario como candidatos a integrarse en el *ground truth* deberán diferenciarse de los demás, por ejemplo, pintándolos de otro color. Los defectos candidatos no se guardarán como parte de un defecto periódico en la base de datos hasta que lo indique explícitamente el usuario.
- Cuando el usuario lo indique, todos los defectos candidatos serán etiquetados en la base de datos como pertenecientes a un defecto periódico. Su periodo será el indicado por el usuario mediante la rejilla de separación longitudinal de defectos. En caso de no haberla utilizado, se guardarán con el periodo teórico. Si se intenta incluir en el *ground truth* un defecto que ya está incluido, se extraerá de él.

4.3.2. Prototipo desarrollado

A continuación se muestra el prototipo desarrollado, el cual cumple con todos los requisitos enumerados en la sección anterior. Éste es una aplicación MFC de múltiples documentos. Cada uno de estos documentos se corresponde con una banda distinta con la que el usuario puede trabajar de forma concurrente. En la figura 4.8 se muestra el aspecto de la ventana principal del prototipo.

4.3.2.1. Datos de entrada/salida

Esta es la parte más sencilla del prototipo. Consta de una ventana, mostrada en la figura 4.9, donde el usuario elige la base de datos de entrada, la banda que quiere utilizar y su superficie. Adicionalmente, también se debe especificar

4.3 Herramienta de ayuda a la clasificación manual



Figura 4.8: Ventana principal de la herramienta de ayuda a la clasificación manual

el nombre de la base de datos donde se guardarán los cambios. En caso de que la base de datos de entrada, o la banda seleccionadas no existan, se emitirá un error al usuario. Si no existiera la base de datos de salida, se crea una copia de la base de datos de entrada con el nombre especificado para la de salida.

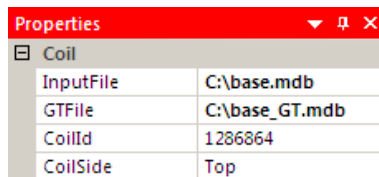


Figura 4.9: Manejo de entrada y salida

4.3.2.2. Visualización de los defectos

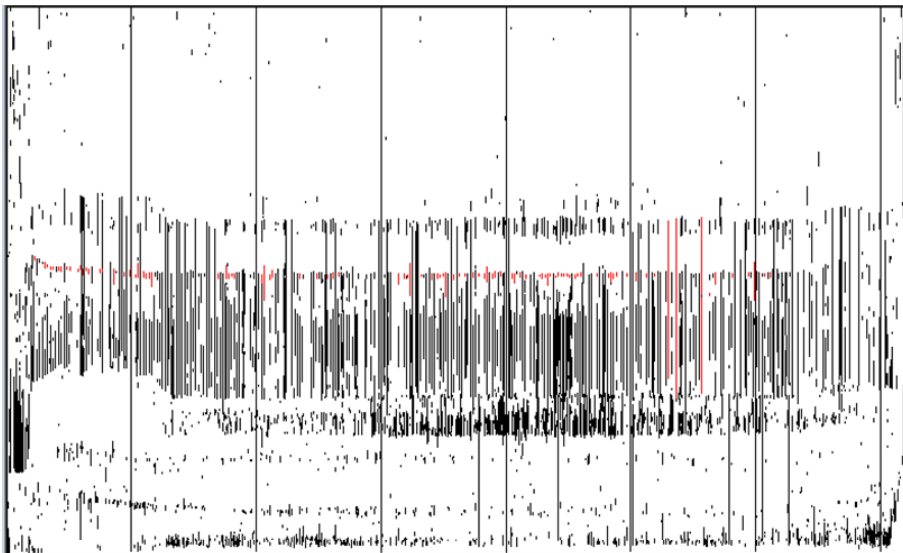
Los defectos superficiales de una banda se muestran en un mapa rectangular, sobre el cual se dibujan los defectos, representados por rectángulos. La banda y los defectos están dibujados siempre con la misma escala y su tamaño es coherente con el tamaño medido por el sistema de inspección para cada uno de ellos. En la figura 4.10 (a) se representa una banda íntegra, con todos sus defectos. Puesto que en análisis de la información en este caso es muy compleja, resulta imprescindible poder modificar el nivel de *zoom* hasta el nivel que el usuario considere más adecuado para poder realizar un análisis correcto de la información representada. En la figura 4.10 (b) se muestra sólo una parte de la misma banda, con un nivel de *zoom* mayor. Los defectos mostrados en color rojo son aquellos que aparecen etiquetados como parte de un defecto periódico en la base de datos de entrada. Éstos son los clasificados como periódicos por el sistema Parsytec. En ambos casos se muestran todos los defectos existentes en el área de banda representada. También se ofrece la posibilidad de mostrar sólo aquellos con mayor probabilidad de pertenecer a un defecto periódico, es decir, los defectos de tipo "Marcas de cilindro" y "Mosaico", que en la base de datos se etiquetan con los códigos numéricos 13 y 14 respectivamente.

Cuando el usuario coloca el cursor del ratón sobre cualquier defecto representado en el mapa y pulsa el botón izquierdo, la herramienta proporciona toda la información que se tiene de él. En la figura 4.11 se muestra el modo en que se proporciona al usuario el identificador, dimensiones, posición y tipo del defecto que ha seleccionado.

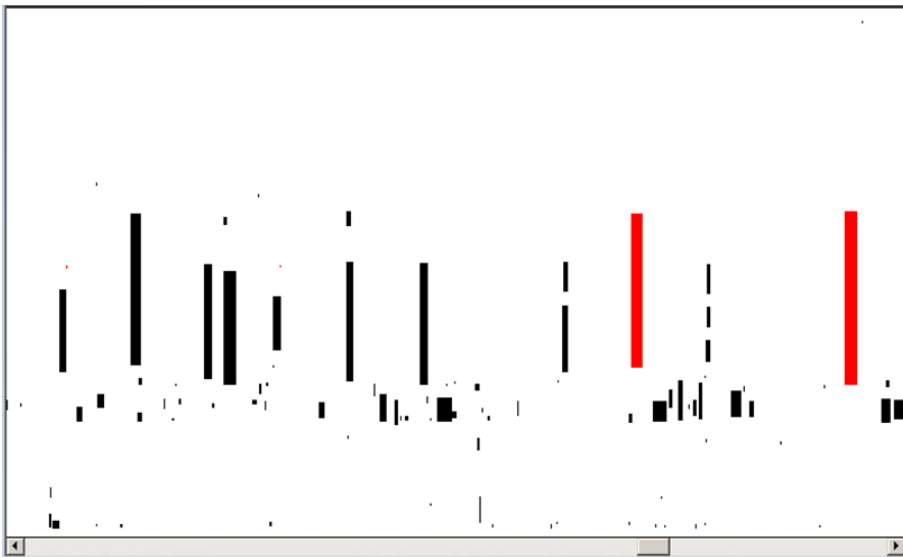
Puesto que la característica más determinante para poder afirmar con seguridad que dos defectos superficiales distintos son parte del mismo defecto periódico es que éstos tengan la misma forma, el modo en que el usuario pueda extraer información de las imágenes tomadas durante la fase de inspección, es crucial. En la figura 4.12 (a) se muestra la ventana en la que se visualiza la imagen del defecto seleccionado en cada momento por el usuario. En el caso de que dicha imagen contenga varios defectos, o que el defecto sea difícil de localizar dentro de la imagen por cualquier motivo, la herramienta ofrece al usuario la posibilidad de rodear éste por un rectángulo de color rojo para eliminar cualquier duda, como se muestra en la figura 4.12 (b).

4.3.2.3. Funcionalidades de clasificación

Las distintas funcionalidades implementadas para facilitar las labores de clasificación son accesibles desde una misma barra de herramientas como la mostrada en la figura 4.13. El botón 7 es el único cuya funcionalidad no es de apoyo a la construcción del *ground truth*, si no de visualización de los defectos, ya que es el encargado de encuadrar los defectos dentro de su correspondiente imagen.



(a) Representación de una banda completa



(b) Representación parcial de una banda

Figura 4.10: Representación de los defectos individuales de una banda de acero

| Defect Description | |
|--------------------|-------------|
| ID | 142 |
| x (m) | 41.118000 |
| y (mm) | 1009.000000 |
| Width (mm) | 14.000000 |
| Height (mm) | 22.000000 |
| Class | 13 |

Figura 4.11: Características de un defecto seleccionado

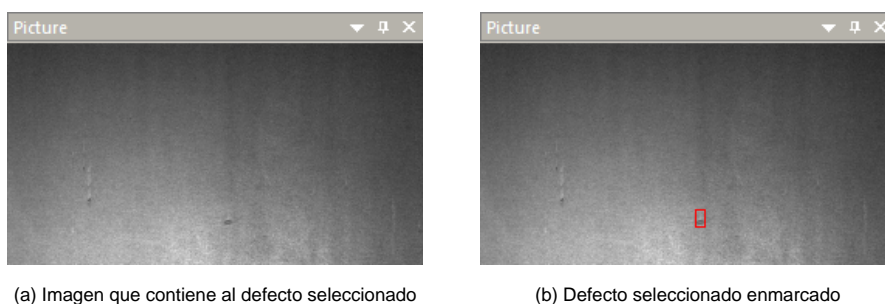


Figura 4.12: Imagen de un defecto seleccionado

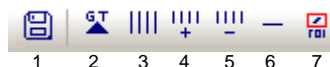


Figura 4.13: Barra de herramientas del prototipo

Mediante el botón 3 de la barra, el usuario puede quitar o poner una rejilla superpuesta en el mapa de defectos que represente la separación existente entre dos defectos consecutivos de la caja de cilindros que haya elegido. Por defecto se muestra la rejilla correspondiente al último cilindro del tren acabador, por ser la caja que más defectos periódicos genera. En el caso de que el periodo teórico de una caja de cilindros no sea exacto, se puede regular con los botones 4 y 5 hasta que la rejilla coincida lo más exactamente posible con los defectos presentes en el mapa. En la figura 4.14, se muestra un defecto periódico con un periodo real de 2187 milímetros, cuando se había calculado un periodo teórico de 2166 milímetros. Si se toman dos defectos individuales del mismo defecto periódico que estén un poco distantes entre sí, este pequeño error puede ser lo suficientemente grande como para que la rejilla superpuesta al mapa no coincida con la sucesión de defectos individuales existentes entre ellos.

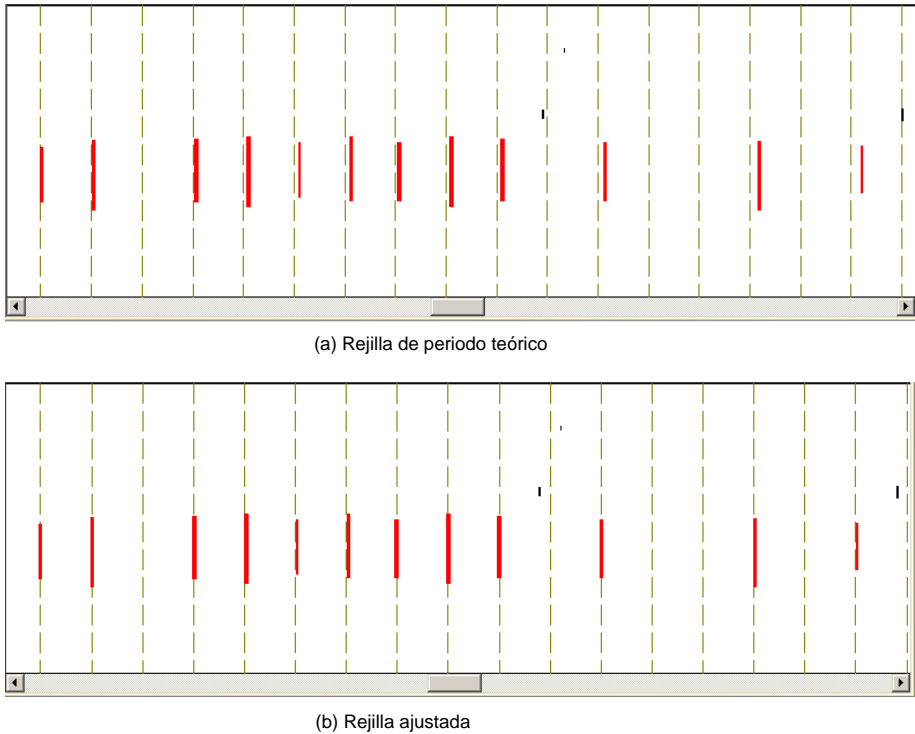


Figura 4.14: Determinación del periodo real mediante una rejilla ajustable

Además de esta rejilla longitudinal, se puede mostrar una rejilla transversal mediante el botón 6 de la barra de herramientas, para comprobar que todos los defectos de una secuencia periódica compartan posición transversal. En una secuencia de defectos de grandes dimensiones como los mostrados en la figura 4.14 no sería necesario ya que se ve a simple vista, pero en ocasiones, sobre todo con defectos pequeños, como los defectos pintados en rojo en la figura 4.15, es más difícil de ver. Además, si hay muchos defectos consecutivos que no han sido detectados durante la fase de inspección (y, por tanto, no aparecen en el mapa) este problema se agrava.

Por otra parte, puede resultar muy útil partir de una clasificación previa, aunque no sea del todo correcta, que partir de cero. Teniendo en cuenta que la clasificación de defectos periódicos hecha por el sistema Parsytec de forma automática durante la laminación de la banda suele ser bastante buena, tomar ésta como punto de partida puede ahorrar bastante tiempo. El usuario debería comprobar si los defectos que ha clasificado como parte de un defecto periódico

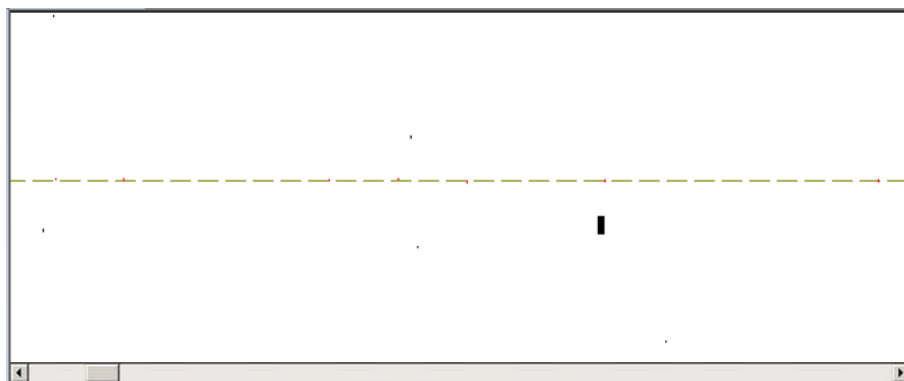


Figura 4.15: Rejilla transversal

lo son realmente, y comprobar si los defectos que, por su tamaño y posición, pueden formar parte de dicho defecto periódico, han de ser incluidos. Por este motivo, los defectos que aparezcan marcados como parte de un defecto periódico en la base de datos de entrada, se representan en rojo, mientras que el resto se representan en negro. Además, para llevar cuenta de qué defectos individuales ha incluido el usuario en su propia clasificación, pulsando el botón 2 de la barra de herramientas, aparecen éstos marcados con un triángulo negro. En la figura 4.16 se muestra parte de una clasificación realizada manualmente partiendo de la efectuada por el sistema Parsytec. En ella, aparecen los defectos clasificados por Parsytec en color rojo, y los incluidos por el usuario marcados con un triángulo negro en la parte superior de cada defecto. Para completar la clasificación realizada por Parsytec, se pueden tomar como primeros candidatos a incluir en la solución aquellos defectos cuya posición coincida con la rejilla superpuesta sobre el mapa.

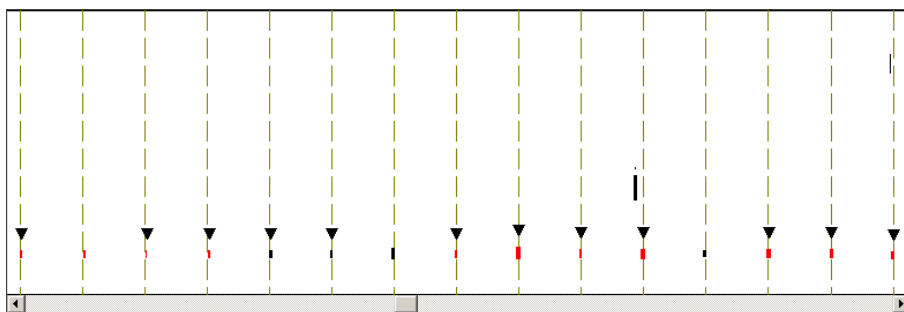


Figura 4.16: Mostrar la clasificación realizada por el sistema Parsytec

Comprobando que la imagen de los defectos a incluir coincide con la del resto de defectos pertenecientes al mismo defecto periódico, éstos se pueden incluir en el *ground truth* pinchando sobre ellos, y pulsando el botón 1 de la barra de herramientas. Para eliminar del *ground truth* defectos individuales que se hayan introducido por error, se opera del mismo modo.

Capítulo 5

Técnica de detección y caracterización automática

El algoritmo propuesto para la caracterización automática de los defectos periódicos es una variante del conocido *backtracking*. El principio de funcionamiento de este tipo de algoritmos es, siguiendo un orden, probar todas las combinaciones de los datos de entrada y comprobar cuáles de ellas son realmente soluciones del problema. En este problema, cualquier combinación de los defectos detectados puede ser, en principio, la solución. En algunos casos, la solución es que ningún defecto individual forma parte de un defecto periódico. En otros casos, algunos de los defectos individuales forman parte de uno o varios defectos periódicos, o incluso puede ocurrir que todos ellos forman parte de un defecto periódico. Esta situación genera un espacio de búsqueda tan inmensamente grande, que un algoritmo de *backtracking* convencional tardaría demasiado tiempo en recorrerlo. Teniendo en cuenta que la resolución del problema está sometida a limitaciones de tiempo, la aplicación de este método es inviable. Para poder utilizarla es imprescindible recortar el espacio de búsqueda lo más posible, para que pueda ser explorado íntegramente en unos pocos segundos. Esto se puede lograr utilizando toda la información disponible sobre la banda y los defectos que se detectaron en ella para recortar el espacio de búsqueda. Esto es: el periodo teórico de cada uno de los cilindros y el tipo, posición y dimensiones de los defectos. En principio, también sería muy útil poder realizar un procesamiento de las imágenes *offline*, pero esta tarea chocaría directamente con las restricciones de tiempo impuestas a la resolución del problema.

Otro factor crucial para la implantación de este método, es que el acceso a los datos que están disponibles sea lo más rápido posible. Si se desarrollase un algoritmo que tenga que realizar una consulta a la base de datos cada vez que necesite consultar un dato, sería demasiado lento. Por ello, también es necesario utilizar una estructura de datos que permita un acceso rápido a toda la información necesaria de la banda y, a ser posible, sin que utilice una gran cantidad de memoria. Para esto hay que tener en cuenta el modo en que hay que recorrer el espacio de búsqueda. Un algoritmo de *backtracking* recorre el espacio de búsqueda

da para hallar la siguiente solución potencial y estudiar su viabilidad. En este caso, partiendo de un único defecto individual, la siguiente solución a probar sería si este defecto podría formar parte de un mismo defecto periódico con el *siguiente* defecto individual de la banda. Para recortar el espacio de búsqueda de un modo inteligente, entenderemos como *siguiente* defecto a aquel que coincida en posición transversal y cuya posición longitudinal sea la misma que el primero sumándole el periodo teórico del cilindro de trabajo que se esté considerando en ese instante. Como se explicará más adelante, es necesario introducir una tolerancia en la posición del *siguiente* defecto, tanto longitudinal como transversal. Por estos motivos, es imperativo que la estructura de datos utilizada para guardar la información permita, de un modo rápido, el acceso a un elemento partiendo de sus coordenadas, como en los accesos a estructuras matriciales.

5.1. Representación de la información en memoria

En realidad, un mapa de defectos puede verse como una matriz gigante. Las dimensiones de la matriz se corresponden con la anchura y longitud de la banda, y cada uno de los elementos representa una pequeña porción de su superficie. Concretamente, cada una de estas posiciones representa la mínima cantidad de área detectable por el sistema de inspección de Parsytec, que es 1mm^2 . Esto quiere decir que una banda de dimensiones convencionales, como podrían ser $1200\text{m} \times 800\text{mm}$ generarían una matriz con cerca de un millón de posiciones.

En una representación muy simplista de un mapa de defectos, cada posición de la matriz podría ser un bit, que indicase si sobre esa área se ha detectado un defecto o no. Esta primera aproximación presenta dos problemas importantes. El primero es que los defectos presentes en las bandas de acero pueden tener tamaños muy diversos, y, obviamente, la mayoría de las veces será mayor que ese tamaño mínimo representable. Este problema, en realidad, tiene fácil solución. Simplemente, en lugar de un utilizar un único bit que indique si existe defecto en esa posición o no, se puede almacenar algo más información, por ejemplo, un identificador, de tal modo que todas las posiciones que pertenezcan al mismo defecto, estén etiquetadas con el mismo identificador. Una solución un poco más económica a ésta, consiste en guardar la información del defecto en un único punto del mismo (por ejemplo el centro). Evidentemente, para conservar todos los datos relativos a las dimensiones del defecto, habrá que almacenar algo más de información que un simple identificador. Concretamente, por cada defecto individual, habrá que almacenar las coordenadas transversal y longitudinal de su punto central, la longitud, la anchura, el área en *pixels* y el tipo asignado por el sistema Parsytec. El segundo de los problemas derivados de almacenar el mapa de la banda como una matriz, es que la mayoría de sus posiciones indicarán que no hay defecto. En la figura 5.1 se representa un mapa correspondiente a una

banda de acero con muchos defectos. Incluso en este caso, la mayor parte de la superficie de la banda está representada en color blanco (sin defectos).

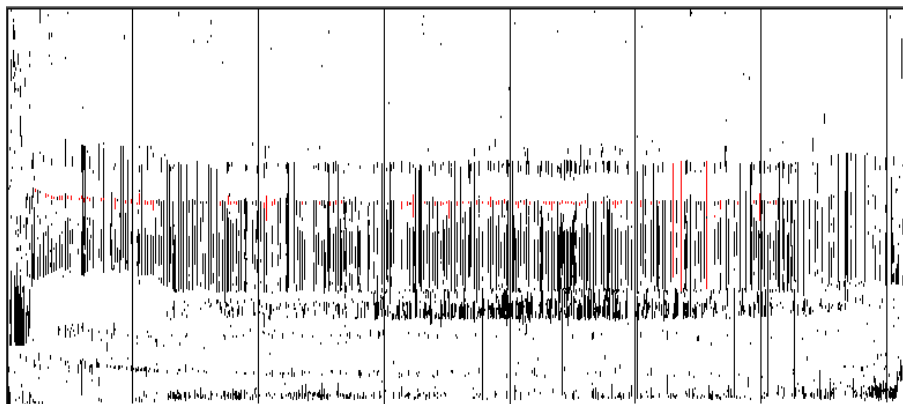


Figura 5.1: Mapa de defectos de una banda de acero

En principio, parece bastante importante evitar el enorme consumo de memoria que se produce almacenando ceros en todas las posiciones de la matriz correspondientes a un área sin defecto. La solución a este problema tiene que pasar, forzosamente, por una representación en memoria que almacene sólo aquellas posiciones de la matriz que sean distintas de cero. Esto podría traducirse en un simple conjunto, en el cual, cada elemento represente a un defecto presente en la banda. Cada uno de estos elementos, tendrá que recoger toda la información relevante del defecto (posición del centro o esquinas, longitud y anchura). Aunque esta solución sea mucho más económica en términos de utilización de memoria, nos priva de la gran ventaja que nos proporcionaba la representación matricial: el acceso "directo" a un defecto conociendo sus coordenadas. Dicho de otro modo, si en un momento determinado de la ejecución de este algoritmo, estamos tratando de averiguar si un defecto situado en la posición (x, y) de la banda forma parte de un defecto periódico, tendremos que comprobar si existe un defecto cuyas coordenadas sean $(x + periodo, y)$. En una representación matricial de la información, la comprobación se puede realizar de una forma sencilla, simplemente accediendo a la posición $matriz[x + periodo][y]$ y comprobando si ésta contiene o no información relativa a un defecto encontrado en la superficie de la banda. En el caso de tener almacenada la información en forma de conjunto o lista de defectos, nos veremos obligados a realizar un recorrido sobre ellos (que deberían estar ordenados de algún modo conveniente) para determinar si en la posición $(x + periodo, y)$ hay un defecto o no. Resumiendo, conseguimos reducir la cantidad de memoria utilizada para representar la información a costa

de incrementar el tiempo de cómputo, lo cual va en contra de las restricciones de tiempo a las que está sujeto el problema.

La forma idónea de representar un mapa de defectos en memoria para este problema en concreto, sería aquel que nos permitiese una indexación de los defectos similar a la matricial pero que sólo albergue las posiciones de la matriz que no sean nulas. Esta representación ya existe: la matriz dispersa. Esta estructura de información se utiliza desde hace muchos años no sólo para almacenar información, como en nuestro caso, si no para realizar todo tipo de operaciones matemáticas con matrices muy grandes y con un elevado número de elementos nulos (en [Tewarson, 1973] se recoge una gran cantidad de aplicaciones de las matrices dispersas).

Una matriz dispersa es una estructura de datos pensada para albergar una matriz con un gran número de elementos nulos. La idea principal reside en guardar en un vector todos los elementos no nulos correlativamente, auxiliado por un par de vectores adicionales que contengan la información necesaria para calcular la posición de cada uno de estos elementos. Uno de los principales problemas de utilizar matrices dispersas está en el gran coste computacional que supone realizar operaciones sencillas de matrices (tales como sumas o productos). Como en nuestro caso este tipo de operaciones no tienen sentido, este problema no nos supone ningún inconveniente, ya que sólo serán utilizadas para almacenar información y acceder a sus elementos rápidamente. En los siguientes subapartados se muestran los formatos de matriz dispersa más ampliamente utilizados en la actualidad. Para ejemplificar cada uno de los casos, se utilizará la siguiente matriz:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 2 & 0 & 0 & 5 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 3 \\ 9 & 7 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

5.1.1. Matrices dispersas coordenadas

Esta representación consiste en almacenar un vector con los elementos no nulos de la matriz, y dos vectores auxiliares. Cada uno de estos vectores se utilizará para guardar las filas y columnas respectivamente de cada elemento no nulo de la matriz. La matriz del ejemplo se representaría en este caso del siguiente modo:

$$\begin{aligned} \text{valores} &= (1 \ 4 \ 10 \ 2 \ 5 \ 1 \ 2 \ 3 \ 9 \ 7 \ 1 \ 1) \\ \text{filas} &= (0 \ 0 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 3 \ 3 \ 4 \ 4 \ 4 \ 4) \\ \text{columnas} &= (1 \ 3 \ 0 \ 1 \ 4 \ 5 \ 3 \ 5 \ 0 \ 1 \ 3 \ 5) \end{aligned}$$

En el vector *valores* se guardan los elementos no nulos ordenados por filas. El elemento i -ésimo del vector *filas* indica la fila en que se encuentra el elemento i -ésimo del vector *valores*. Análogamente, el elemento i -ésimo del vector *columnas* indica la columna en que se encuentra el elemento i -ésimo del vector *valores*. En un caso general, de una matriz de dimensiones $m \times n$ y con nz elementos no nulos, harían falta nz elementos para el vector *valores*, nz elementos para el vector *filas* y otros tantos para el vector *columnas*. En total, la matriz se representaría con $3nz$ elementos. Como se comentará más adelante, un elemento no nulo de la matriz (vector *valores*) tiene que almacenar varios datos relativos al defecto. Concretamente, si se guarda toda la información almacenada en la base de datos sobre posición y características de cada defecto que sea necesaria para realizar la clasificación de defectos periódicos, serán necesarios 40 bytes por cada uno. Los vectores *filas* y *columnas* utilizan elementos de 4 bytes (datos de tipo entero para hacer de índice). La longitud de una banda de acero oscila entre los 500 y 1.500 metros (es decir, entre 500.000 y 1.500.000 filas) y tiene una anchura de entre 1 y 1,5 metros (entre 1.000 y 1.500 columnas). Si se almacenara la banda como una matriz tradicional, ésta ocuparía entre 18 y 83GB en promedio, una cantidad de memoria excesiva para cualquier computador actual. Como este formato de codificación no depende de las dimensiones de la matriz, si no solamente del número de elementos no nulos, el espacio requerido para almacenar la información de una banda normal se reduce enormemente. Lo normal es que una banda presente entre 500 y 5.000 defectos individuales, por tanto, una banda podría ocupar entre 23 y 230KB.

Aunque esta representación sea aplicable a nuestro problema, presenta un inconveniente. Si el acceso a un elemento (x, y) de la matriz se realiza utilizando el operador corchete típico de las matrices, éste operador deberá hacer un recorrido por los elementos de la matriz para acceder al elemento solicitado. Concretamente, si en un momento determinado estuviésemos analizando la existencia de un defecto en la posición (x, y) de la matriz para integrarlo en un defecto periódico, habría que consultar la posición $(x + periodo, y)$ para buscar el siguiente elemento de la sucesión periódica. Para esto, no hay más remedio que recorrer los vectores *filas* y *columnas* para determinar en qué posición están el par de elementos cuyos contenidos sean $x + periodo$ e y respectivamente. Aunque esta representación nos ahorre una buena cantidad de memoria, nos lo hace pagar con un acceso costoso a sus elementos.

5.1.2. Matrices dispersas con índices de filas

Como se comentó en el subapartado anterior, el formato de matriz dispersa coordenada podría ser aplicado en nuestro caso, aunque presenta una desventaja en cuanto a tiempo de computación. Las matrices dispersas con índices de filas, también denominadas como *Yale Sparse Matrix Format* [Eisenstat *et al.*, 1975],

reducen este problema. El modo de almacenar las matrices en memoria es muy similar al caso de las matrices dispersas coordenadas. La única diferencia es que en lugar de tener un vector *filas* donde se almacena la fila a la que pertenece cada elemento no nulo de la matriz, se almacena un vector de punteros de fila. En el vector *valores* seguimos teniendo los elementos no nulos de la matriz. El nuevo vector, *filas_ptr*, almacena la posición que ocupa el primer elemento no nulo de cada fila dentro del vector *valores*. Dicho de otro modo, el elemento *i*-ésimo del vector *filas_ptr* nos indica la posición que ocupa dentro del vector *valores* el primer elemento no nulo de la fila *i*. Si todos los elementos de la fila *i* son nulos, la posición *i*-ésima de dicho vector deberá contener un código especial que nos indique que la fila está vacía. En el ejemplo que se muestra a continuación, esto se denota mediante un -1. Utilizando este método, la matriz de ejemplo se codifica de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{valores} &= (1 \ 4 \ 10 \ 2 \ 5 \ 1 \ 2 \ 3 \ 9 \ 7 \ 1 \ 1) \\ \text{columnas} &= (1 \ 3 \ 0 \ 1 \ 4 \ 5 \ 3 \ 5 \ 0 \ 1 \ 3 \ 5) \\ \text{filas_ptr} &= (0 \ -1 \ 2 \ 6 \ 8 \ 12) \end{aligned}$$

La posición 1 del vector *filas_ptr* contiene un -1, lo que indica que la fila 1 está vacía. Del mismo modo, las posiciones 2 y 3 del vector *filas_ptr* contienen un 2 y un 6 respectivamente. Esto indica que el primer elemento de la fila 2 está en la posición 2 del vector *valores* (el elemento de valor 10) y el primer elemento de la fila 3 está en la posición 6 (un elemento de valor 2). De ahí podemos deducir que los elementos que componen la fila 2, están comprendidos entre las posiciones 2 y 5 del vector *valores* (inclusive). Generalizando, los elementos de la fila *k* están guardados dentro del vector *valores* entre las posiciones *filas_ptr(k)* y *filas_ptr(k + 1) - 1* (salvo el caso especial en que *filas_ptr(k)* valga -1, lo que indica que la fila está vacía). Por este motivo el vector *filas_ptr* tiene un elemento más que el número de filas (en el ejemplo, la matriz tiene 5 filas y el vector *filas_ptr* tiene 6 elementos). Cuando se quiera saber qué parte del vector *valores* está ocupado por los elementos de la última fila, se ha de utilizar esta misma regla general. Por este motivo, es necesario que exista un elemento adicional en el vector *filas_ptr*, y que éste contenga la posición del último elemento del vector *valores* más uno. De este modo, averiguar qué elementos se corresponden con la última fila de la matriz (la fila 4) se hace del mismo modo que con cualquier otra fila. Serían los elementos del vector *valores* comprendidos entre *filas_ptr(4)* y *filas_ptr(5) - 1*, es decir, entre las posiciones 8 y 11 (inclusive). Con esto podemos saber en qué fila se encuentra cada elemento del vector *valores*. Obtener la columna se realiza de forma inmediata igual que en el formato de matrices dispersas coordenadas, consultando el vector *columnas*.

Aunque en el ejemplo mostrado anteriormente parezca que con este formato se

requiere menos memoria (ya que el vector *filas_ptr* es menor que el vector *filas* del formato de matrices coordenadas), esto no tiene por qué ser siempre así. En el caso de las matrices coordenadas, el vector *filas* tenía tantos elementos como elementos no nulos tiene la matriz a codificar. Ahora, con el formato de matrices con índices de fila, el vector *filas_ptr* tiene tantos elementos como filas tiene la matriz a codificar. Es decir, si la matriz tiene más filas que elementos no nulos (como es nuestro caso), este nuevo formato ocupa más en memoria. En el caso del ejemplo utilizado para ilustrar los distintos formatos de matriz dispersa, como el número de filas es menor que el de elementos no nulos, la codificación ocupa menos. En promedio, las bandas de acero ocuparán, utilizando este formato, entre 2 y 6MB. Aunque el consumo de memoria utilizando este formato sea muy superior al requerido en el caso anterior, sigue suponiendo una porción de memoria insignificante en comparación con la cantidad que suele tener instalada cualquier computador actual (de hecho, no debería suponer ningún problema ni para computadores con varios años de antigüedad).

Este formato ayudaría a reducir el tiempo de computación, ya que permite, mediante los punteros de fila, acceder a los elementos de una fila concreta sin tener que recorrer la matriz completa. Aunque la sustitución del vector *filas* por el *filas_ptr* ayude en este sentido, perjudica en otro. Esto es porque en muchas ocasiones será necesario conocer las coordenadas (x, y) de un defecto dentro de la banda para tratar de localizar, si lo hubiera, el siguiente defecto de la misma sucesión periódica en la posición $(x + periodo, y)$. Acceder a la fila $x + periodo$ ahora resulta sencillo. El problema es que no se almacena en ningún sitio la coordenada y del resto de defectos individuales de la sucesión periódica. Esta coordenada podría ser hallada recorriendo la matriz, lo que supone el mismo problema que había con las matrices dispersas coordenadas.

Teniendo en cuenta que el espacio ocupado en memoria por las bandas de acero utilizando cualquiera de estos dos formatos de matriz dispersa es muy pequeño, se podría realizar una combinación de ambos. De este modo los inconvenientes que presentan cada uno de ellos desaparecerían y, supuestamente, seguirían teniendo un bajo consumo de memoria.

5.1.3. Matrices dispersas híbridas

Los dos formatos de matriz dispersa expuestos anteriormente podrían ser aplicados en nuestro caso, pero cada uno presenta su inconveniente particular. En ambos casos se trata de requerir tiempo de cómputo adicional al realizar ciertas operaciones de acceso a la información. En el caso de las matrices coordenadas, necesitamos recorrer parte de la matriz para localizar los elementos de una fila determinada. En el caso de las matrices con índices de fila, podemos acceder al primer elemento de una determinada fila en tiempo constante, pero desconocemos la fila a la que pertenece un elemento determinado (salvo que hayamos

llegado a él a partir de uno de estos índices). Resumiendo: si tenemos un vector de índices, no tenemos la información relativa a las filas a las que pertenece cada elemento de la matriz, y si tenemos el vector de filas, no sabemos donde está localizado el primer elemento de cada fila. Si guardamos los dos vectores en vez de tener solamente uno de ellos, no tendríamos ninguno de estos problemas. En este caso, la matriz de ejemplo se compone de 4 vectores, como se muestra a continuación.

$$\begin{aligned} \text{valores} &= (1 \ 4 \ 10 \ 2 \ 5 \ 1 \ 2 \ 3 \ 9 \ 7 \ 1 \ 1) \\ \text{filas} &= (0 \ 0 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 3 \ 3 \ 4 \ 4 \ 4 \ 4) \\ \text{columnas} &= (1 \ 3 \ 0 \ 1 \ 4 \ 5 \ 3 \ 5 \ 0 \ 1 \ 3 \ 5) \\ \text{filas_ptr} &= (0 \ -1 \ 2 \ 6 \ 8 \ 12) \end{aligned}$$

Con este formato, en promedio, cada banda ocupa entre 4 y 12MB de memoria, una cantidad perfectamente asumible. Además, se reduce lo más posible el tiempo de búsqueda de elementos dentro de la matriz. Esta parece ser la representación de la información que mejor se ajusta a las necesidades del problema a resolver. Por desgracia, ninguna de las librerías de matrices dispersas que hay disponibles (por ejemplo CSparse [Davis, 2006] o SparseLib++ [Pozo *et al.*, 2008]), implementa este formato, ya que éstas están pensadas para realizar eficientemente cálculos matriciales, y no el tipo de búsquedas requeridos en este problema. Por este motivo, además de tener que implementar el algoritmo, ha sido necesario desarrollar una clase que permita almacenar la información de los defectos de cada banda con este formato.

5.2. Algoritmo de detección y caracterización

Una vez que se dispone de una estructura como la mostrada anteriormente, ya se puede realizar la caracterización de defectos periódicos de un modo eficiente. Esta detección se realizará mediante un algoritmo recursivo que recorre todo el espacio de búsqueda. Si se tienen n defectos individuales en la superficie de la banda, el espacio de búsqueda, en principio, serían todas las combinaciones de n elementos tomadas de j en j para todo j desde 1 hasta n . Además, este espacio de búsqueda debe ser recorrido por completo, ya que si en un determinado instante durante el proceso de caracterización se han agrupado un conjunto de defectos individuales como parte de un defecto periódico, aunque éstos puedan considerarse como una solución al problema de la caracterización completa de un defecto periódico, no son más que una solución parcial, ya que podría haber más defectos individuales que incluir en ese conjunto. Por tanto, las soluciones parciales no se pueden incluir en la solución final (caracterización final y

completa) hasta que se haya comprobado si cada uno de los demás defectos individuales pueden ser añadidos a ella, con el fin de obtener una caracterización lo más completa posible. Como este espacio de búsqueda es demasiado grande como para poder ser recorrido por completo en un lapso de tiempo razonable, debe ser reducido. Conociendo el proceso de laminación de las bandas y las características de los defectos periódicos, es posible reducirlo hasta un tamaño lo suficientemente pequeño como para que pueda ser recorrido por completo en pocos segundos.

Si se están detectando defectos periódicos de un cilindro de desarrollo p , el algoritmo comenzará la búsqueda por un defecto individual no incluido en ningún otro defecto periódico (ya que no tiene sentido que un mismo defecto individual haya sido generado por dos cilindros de trabajo distintos). Este defecto individual se incluirá en una agrupación parcial provisional, y se comprobará si el *siguiente* defecto individual se puede agrupar con él. Se continuará el proceso recorriendo todos los demás defectos individuales no incluidos previamente como parte de otro defecto periódico, comprobando cuáles se pueden agrupar con los introducidos previamente en la agrupación parcial. Con el objetivo de no tener que comprobarlos a todos y para reducir el tamaño del espacio de búsqueda, se ignorarán los defectos individuales que cumplan alguna de las siguientes condiciones:

- Su posición transversal no coincide con la posición transversal de los defectos individuales ya incluidos en la agrupación parcial.
- La separación longitudinal con el defecto individual más cercano insertado en la solución parcial es distinta de p .
- Sus características morfológicas son significativamente distintas a las de los defectos individuales incluidos en la agrupación parcial.
- El tipo que le ha asignado el sistema Parsytec es distinto al de los defectos individuales incluidos en la agrupación parcial.

El que un defecto individual cumpla una de las dos últimas condiciones no significa necesariamente que no haya sido generado por el mismo problema del mismo cilindro de trabajo. Por ejemplo, en la figura 5.2 se puede ver como dos defectos cuya forma es idéntica y que deberían formar parte de un mismo defecto periódico, tienen unas dimensiones muy distintas, debido a una mala detección en la fase de inspección.

Del mismo modo, durante la fase de inspección, el sistema Parsytec puede haber asignado un tipo incorrecto a uno o varios defectos individuales generados por un mismo cilindro de trabajo, con lo que éste sería ignorado y no se incluiría en la solución final. Pese a que ignorando a los defectos que cumplen una de

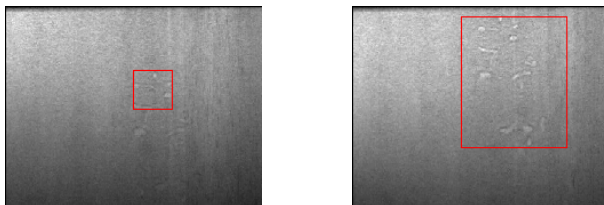


Figura 5.2: Diferencia dimensional entre defectos individuales generados por un mismo cilindro defectuoso

estas condiciones la caracterización obtenida es menos completa, merece la pena hacerlo así, ya que la reducción en el espacio de búsqueda es enorme, lo que permite aplicar un algoritmo de *backtracking* para recorrerlo.

Teniendo en cuenta el nuevo espacio de búsqueda definido, el algoritmo comenzaría una búsqueda recursiva a partir de cada uno de los defectos individuales detectados en la banda para cada desarrollo de cilindro. A partir de un defecto situado en la posición (x, y) y para un cilindro de desarrollo p , se ha de comprobar si existe otro defecto en la posición $(x + p, y)$, posición que correspondería al siguiente defecto individual de un defecto periódico de periodo p . Si hay éxito, se realizará una nueva búsqueda en la posición $(x + 2p, y)$, y así sucesivamente hasta que finalice el defecto periódico (o se haya llegado al final de la banda). Todos los defectos individuales que se hayan ido encontrando serán etiquetados como integrantes de un mismo defecto periódico. Como un defecto individual sólo debería pertenecer a un defecto periódico, en sucesivas búsquedas, no se considerarán a los defectos individuales que ya hayan sido incluidos dentro de un defecto periódico. A continuación se muestra el *pseudocódigo* de la versión más simple de este algoritmo, al cual se le aplicarán diversas mejoras:

```

Para cada defecto d
  d.clasificado=NO_CLASIFICADO
  Declarar Solucion s

Para cada desarrollo p
  Para cada defecto d (x, y)
    Si d.clasificado=NO_CLASIFICADO
      Declarar Defecto_periodico dp
      dp.incluir( d )
      Buscar(x+p, y, dp, p)
      s.incluir(dp)
    Fin Si
  Fin Para
Fin Para

Procedimiento Buscar (i, j, DefectoPeriodico, periodo)
  Si matriz(i,j) != Vacio
    Si matriz(i,j).clasificado=NO_CLASIFICADO
      DefectoPeriodico.incluir( matriz(i,j) )
      matriz(i,j).clasificado=CLASIFICADO

```



```
        Buscar(i+periodo, j, DefectoPeriodico, periodo)
    Fin Si
Fin Si
Fin Procedimiento
```

Esta es una versión muy simplificada del algoritmo finalmente implementado. El primer problema que presenta es que cada defecto individual que origina una búsqueda recursiva crea un nuevo defecto periódico. En el caso de que ningún otro defecto individual se pueda incluir en este defecto periódico por no coincidir su posición, queda incluido en la solución devuelta por el algoritmo un defecto periódico con un solo elemento (del mismo modo, podría haber defectos periódicos de dos o tres elementos). Para que esto no ocurra, y como se detalla en la sección 2.2 es necesario establecer un número mínimo de defectos individuales que debe tener un defecto periódico. En caso de que el número de defectos individuales incluidos en un mismo defecto periódico no llegue a dicho mínimo, éste no se incluye en la caracterización devuelta por el algoritmo.

Según el *pseudocódigo*, se incluye un defecto individual en el defecto periódico si su posición "encaja" en la búsqueda, es decir, si tiene la misma posición transversal que los anteriores y si su posición longitudinal es la misma del último defecto individual insertado más el desarrollo del cilindro de trabajo que se está procesando. Además de esto, para poder incluirlo en el defecto periódico, habría que comprobar que es del mismo tipo que los incluidos en el defecto periódico y que sus dimensiones son iguales.

Un factor muy importante y que puede tener mucha influencia en los defectos individuales que finalmente se incluyen en un defecto periódico es el defecto que se toma para comenzar la búsqueda recursiva, entre otras cosas, debido a que su posición transversal es la que condiciona la posición transversal de los defectos que se van a incluir en el defecto periódico. Con el objetivo de encontrar el mayor número de defectos en las primeras búsquedas que se realicen, éstas deberían comenzar en las posiciones transversales con mayor número de defectos individuales detectados. En la figura 5.3 se muestra una banda con una gran cantidad de defectos individuales en la zona transversal central. El histograma, dibujado a la izquierda del mapa, muestra el número de defectos cuyo centro se encuentra en cada una de las coordenadas transversales de la banda. Si se comenzase la búsqueda en la zona transversal marcada con la línea roja, ésta, en principio, agruparía más defectos que otra búsqueda que comience en otra posición transversal. El orden en que deberían ir recorriendo los diferentes defectos individuales de la banda para desencadenar las búsquedas debería estar determinado por este histograma, comenzando por las zonas cuyo valor de histograma sea mayor. Aquellas coordenadas transversales cuyo valor de histograma sea inferior al número mínimo de defectos individuales establecido para formar un defecto periódico no se explorarán, ya que nunca podrán crear un defecto

periódico.

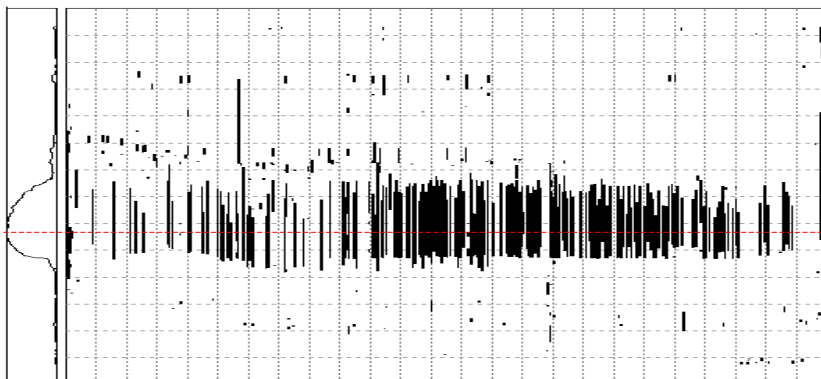


Figura 5.3: Mapa de una banda de acero con su histograma

Utilizando este método, queda determinado en cada momento en qué posición transversal se buscarán defectos individuales para agrupar a continuación, pero sigue existiendo el problema de elegir el defecto con el que comenzará la búsqueda. Con el objetivo de conseguir agrupar el mayor número de defectos posible, el algoritmo ha sido modificado para que realice una búsqueda que comience en cada uno de los defectos individuales de una misma posición transversal, insertando en la solución aquella que haya conseguido agrupar un mayor número de defectos individuales. Según el *pseudocódigo* presentado anteriormente, una búsqueda recursiva que comienza en un defecto concreto, busca más defectos para agruparlos desde su propia posición hacia el final de la banda. Evidentemente, utilizando este sistema, los defectos individuales que estén mas cerca del final de la banda tienen menos candidatos para agruparse a ellos en un mismo defecto periódico. Para que esto no ocurra, la función ha de buscar defectos a agrupar desde la posición del defecto que inicia la búsqueda hacia el final de la banda y, a continuación, hacia el comienzo, barriendo en todos los casos toda la longitud completa de la banda para cada posición transversal.

Un detalle en el pseudocódigo que puede pasar desapercibido y que puede determinar en gran medida los resultados obtenidos, es el orden en que se procesan los siete cilindros de trabajo. Empezar buscando defectos en el cilindro con menor desarrollo puede, en ocasiones, dar unos resultados bastante diferentes a los que se hubieran obtenido de haber comenzado a buscar los defectos en el cilindro de desarrollo mayor. Esto ocurre cuando algunos de los desarrollos son múltiplos de otros (hecho que se produce con relativa frecuencia). En la tabla 5.1 se muestran los desarrollos de cada una de las siete cajas en un caso real.

Cada uno de los valores de d_i se corresponde con el desarrollo del cilindro

| d_0 | d_1 | d_2 | d_3 | d_4 | d_5 | d_6 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 18458 | 9014 | 6131 | 4308 | 2802 | 2336 | 2166 |

Tabla 5.1: Ejemplo de desarrollo de los cilindros de trabajo

i-ésimo, especificado en milímetros. Si al laminar una banda el cilindro 5 produce una marca de forma periódica, como el desarrollo del cilindro 0 coincide, aproximadamente, con la octava parte del que está marcando la banda (hay un 1,8% de diferencia), si se lanza primero la búsqueda de defectos periódicos en el cilindro 0, encontrará que existe un defecto que se repite de forma periódica y cuyo periodo se corresponde con el desarrollo de ese cilindro. Lo que en realidad ocurre, es que encuentra uno de cada nueve de los defectos individuales producidos por el cilindro 5. Este hecho tiene dos consecuencias importantes. La primera es que el resultado de la búsqueda informará de que existe un problema con el cilindro 0, siendo esto falso. El segundo es que los defectos individuales que se hayan asignado al falso defecto periódico producido por el cilindro 0, no se podrán asignar al defecto periódico al que realmente pertenecen, ya que en una búsqueda posterior el algoritmo ignora los defectos individuales que ya hayan sido integrados dentro de un defecto periódico. En este caso particular, esto último no sería especialmente dañino, ya que sólo faltaría un defecto individual de cada nueve. Esto sería mucho más perjudicial si se produjera un defecto periódico debido al cilindro 6 y se lanzara una búsqueda para encontrar los defectos periódicos correspondientes al cilindro 3 (cuyo desarrollo es, aproximadamente, el doble). Al realizar la búsqueda de defectos producidos por el cilindro 3, se clasificarían como suyos la mitad de los defectos individuales. Este porcentaje ya es demasiado grande, ya que si alguno de los demás defectos individuales producidos por el cilindro 6 no se hubiera detectado durante la fase de inspección, podrían quedar demasiados pocos defectos individuales como para ser agrupados en un defecto periódico, con lo que el algoritmo no avisaría de que dicho cilindro está generando defectos. Este resultado sería desastroso, ya que no sólo se estaría dando como resultado que el cilindro de trabajo de la caja 3 está dañado (siendo esto falso), si no que no informaría de que sí lo está el cilindro de la caja 6. Ante estos resultados, el operario de turno podría detener la producción para sustituir un cilindro en buen estado inútilmente, y además el problema se seguiría produciendo, con los costes que ello supone.

Si se realizara la búsqueda comenzando por los desarrollos menores, este problema podría aparecer a la inversa, pero sus consecuencias serían mucho menos perjudiciales. Para empezar, un defecto producido por el cilindro 0 nunca podrá ser tomado equivocadamente como del cilindro 6, ya que por cada par de defectos individuales encontrados, habría 9 por el medio no detectados. Aunque

comenzando la búsqueda de defectos periódicos por los cilindros con desarrollos más pequeños sigue existiendo la posibilidad de detectar defectos periódicos inexistentes, la probabilidad de que esto ocurra es mucho menor. Además, viendo las clasificaciones realizadas por el sistema Parsytec en bandas reales, se puede comprobar que los defectos periódicos producidos por cilindros de menor desarrollo son mucho más frecuentes que los producidos por cilindros de desarrollos mayores. Por estos motivos, la búsqueda de defectos periódicos comenzará por el de menor desarrollo y terminará por el de mayor desarrollo.

5.3. Parametrización de la búsqueda

En el subapartado anterior se ha dado una descripción muy simplificada de cómo va a funcionar el algoritmo a la hora de buscar los defectos individuales que debe agrupar. Este proceso se basa en la posición de un defecto y la posición del siguiente (teniendo en cuenta la periodicidad teórica del defecto periódico). Este proceso de búsqueda se repite hasta que se dejen de encontrar defectos. Esto, en la práctica, es mucho más complejo. El primer problema que surge es lo que se entiende por la posición de un defecto. Cada defecto individual ha sido encuadrado por el sistema Parsytec dentro del rectángulo más pequeño capaz de contenerlo, como se muestra en la figura 5.4.

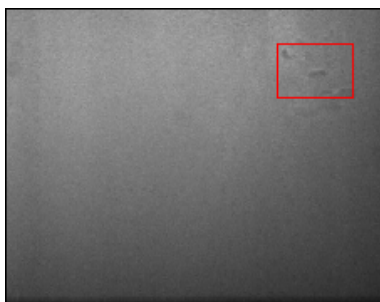


Figura 5.4: Defecto individual encuadrado automáticamente

Para que se pueda incluir en la matriz dispersa la información relativa a todos los defectos sin que esto consuma mucha memoria, es necesario situar cada defecto en un único punto (o una única posición de la matriz), en lugar de hacerlo en todos los puntos correspondientes al área que ocupan en realidad. Por lo tanto, para poder hablar de la posición de un defecto individual habrá que definir previamente qué punto de ese rectángulo es el que va a representar a todo el defecto.

En la base de datos, para cada defecto individual, se almacena la distancia que hay entre la parte superior del rectángulo que lo encuadra y el comienzo de la banda, la distancia que hay entre lado derecho del rectángulo y el borde derecho de la banda y entre el lado izquierdo del rectángulo y el borde izquierdo de la banda. Es decir, en la base de datos se almacenan las coordenadas de las dos esquinas superiores del rectángulo que encuadra cada defecto individual. Ya se comentó anteriormente, que los sistemas de inspección superficial que utilizan técnicas de visión por computador, como es el caso del sistema Parsytec, son poco precisos. Para un conjunto de defectos individuales pertenecientes al mismo defecto periódico, los rectángulos que encuadran a cada uno de ellos pueden tener longitudes y anchuras muy diferentes, incluso la posición relativa del rectángulo respecto al centro del defecto puede variar, como se ve en la figura 5.5.

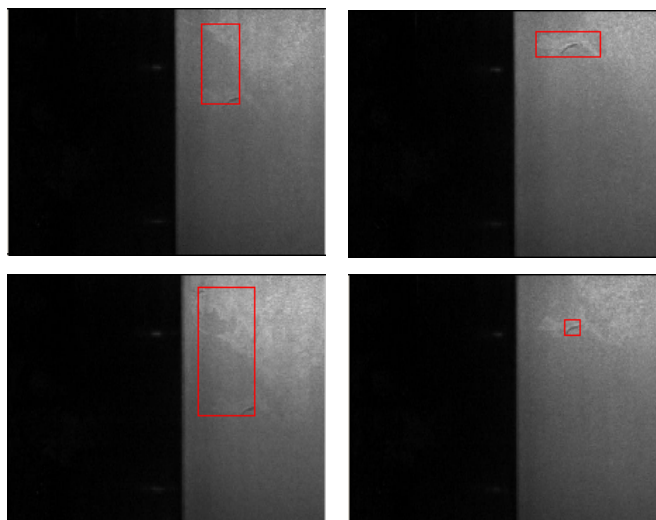


Figura 5.5: Imprecisión en la detección de los defectos individuales

Para tratar de reducir al mínimo el error a la hora de asignar una posición a cada uno de los defectos individuales, lo más adecuado parece que es asignarle el punto central del rectángulo que lo encuadra (aunque la posición del punto central no aparezca explícitamente en la base de datos, puede calcularse fácilmente). Una vez hecho esto, se pueden cargar los puntos centrales de todos los defectos individuales en una matriz dispersa. Si se comienza una búsqueda a partir de un defecto individual cuyo centro está situado en la posición (x, y) , ésta tendría éxito si el centro del siguiente está en la posición $(x + \text{periodo}, y)$. Aunque el hecho de utilizar los puntos centrales en lugar de una de las dos esquinas minimice ligeramente los errores introducidos en la fase de procesamiento de

imágenes, este error sigue estando presente. Salvo que los defectos individuales hayan sido encuadrados exactamente del mismo modo (cosa poco habitual), la búsqueda no tendrá éxito. Para evitar esto, es necesario dejar ciertos márgenes de tolerancia, tanto en el eje transversal como en el longitudinal. En la figura 5.6 se ilustra el concepto de *área de búsqueda*. Si los puntos rojos fuesen los centros de sendos defectos individuales y el de la izquierda se hubiera incluido dentro de un defecto periódico, se debería buscar el centro del siguiente defecto individual dentro del rectángulo de color más claro, denominado área de búsqueda.

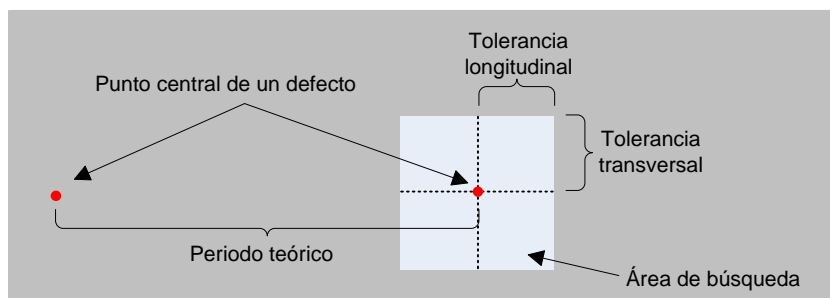


Figura 5.6: Área de búsqueda

De este modo, cuando se proceda a buscar el siguiente defecto individual de un defecto periódico, la búsqueda no se realizará sólo en el punto en que se esperaría encontrar (cuyas coordenadas se denominan *coordenadas teóricas de la búsqueda*), si no dentro de dicha área de búsqueda. Esta área queda definida como un rectángulo cuyo centro coincide con las coordenadas teóricas de la búsqueda, cuya anchura será el doble de la tolerancia transversal y la longitud el doble de la tolerancia longitudinal. Establecer unos valores adecuados para estas tolerancias es clave. Si las tolerancias son muy pequeñas, sólo se encontrarán los defectos individuales que estén muy cerca de su posición teórica, lo que haría que el detector fuese muy sensible a pequeños desplazamientos de los defectos sobre la superficie de la banda y a los fallos producidos durante la fase de inspección. Si por el contrario se establecen unas tolerancias grandes, el área de búsqueda crece de forma cuadrática. Esto provocaría que, sobre todo en zonas con una alta densidad de defectos individuales, fuese demasiado fácil agrupar defectos de naturaleza no periódica dentro de los defectos periódicos. Un problema introducido por el uso de áreas de búsqueda es decidir qué hacer cuando dentro de éste área hay más de un defecto. Se puede resolver este problema de múltiples formas, como por ejemplo elegir el defecto cuyas dimensiones sean más parecidas a la del resto de defectos individuales introducidos en el defecto periódico, o elegir el defecto cuyo centro esté más próximo al punto central del área de búsqueda.

Además de utilizar un área de búsqueda parametrizable para paliar el efecto de un desarrollo teórico poco preciso, también se puede realizar una corrección de dicho valor en tiempo de ejecución. Si durante la ejecución del algoritmo se van encontrando defectos individuales con una periodicidad muy similar (pero no igual) al desarrollo teórico, se puede ir modificando este valor realizando una media recursiva entre el valor teórico y los distintos valores reales que se encuentran para cada defecto individual detectado. De este modo se puede acercar el valor teórico del desarrollo al valor real observado. Cuanto más se aproxime el desarrollo teórico al desarrollo real, será más difícil no detectar un defecto individual que pertenezca al defecto periódico que se esté procesando cuando los defectos individuales no estén situados en su posición teórica (debido a un mal encuadramiento de los mismos o a un cálculo poco preciso del desarrollo del cilindro).

Como ya se comentó en el subapartado anterior, el algoritmo debería tener en cuenta las dimensiones y el tipo de los defectos individuales para que éstos sean incluidos dentro de un defecto periódico. Según se presenta en el *pseudocódigo*, sólo se tiene en cuenta que la posición del defecto a insertar en el defecto periódico sea la correcta. Para tratar de evitar en la medida de lo posible agrupar defectos individuales que no sean parte de un mismo defecto periódico, se debe comprobar que todos tengan las mismas características. Esto es, que todos tengan una anchura, longitud y área en *pixels* similares y que en la fase de inspección llevada a cabo por el sistema Parsytec hayan sido clasificados como del mismo tipo. Al igual que se hace con la posición de los defectos individuales a incluir en la solución, también se deben establecer unas tolerancias para la anchura, longitud y área de los defectos, ya que es muy improbable que todos tengan estas características exactamente iguales. Si se tiene un defecto periódico donde todos sus defectos individuales tienen un área aproximada de 10mm^2 y posteriormente nos encontramos con un defecto individual dentro del área de búsqueda pero con un área 10 veces mayor a este valor, se podría suponer que no son de la misma naturaleza (y por tanto no debería ser clasificado como parte de este defecto periódico). De todos modos, como ya se mostró anteriormente en la figura 5.5, el área del rectángulo en el que el sistema Parsytec encuadra los defectos suele variar sensiblemente. En ocasiones, esta variación puede ser muy grande. Aunque no es habitual, puede haber casos extremos en los que dos defectos individuales de un mismo defecto periódico tengan áreas con una diferencia del 1000%, pero sí es bastante fácil que dentro de un mismo defecto periódico, sus defectos individuales tengan una diferencia de área del 200 ó 300%. Por tanto, cada defecto individual que vaya a ser incluido, debe tener un área comprendida en el rango $area_media \pm tolerancia$ (ídem para la longitud y la anchura). Este área media debe ser determinada como la media recursiva de las áreas de todos los defectos individuales insertados hasta el momento en la agrupación, con el objetivo de disminuir el error introducido por la poca preci-

sión del procesamiento de las imágenes realizado durante la fase de inspección.

Otro factor importante a tener en cuenta a la hora de determinar si incluir o no a un defecto individual como parte de un defecto periódico es el tipo que tenga éste. El sistema Parsytec, al analizar las imágenes de los defectos se encarga de determinar su posición y tamaño, además de estimar, según la morfología del defecto, de qué clase es. Existen dos tipos de defecto predefinidos denominados "Marca de cilindro" y "Mosaico" que, supuestamente, son los que deberían ser asignados a los defectos individuales que hayan sido producidos de forma periódica por un cilindro de trabajo durante el proceso de laminación del acero. Por ello, se debería tener en cuenta, a la hora de hacer la agrupación, sólo aquellos defectos que hayan sido etiquetados con uno de estos dos tipos. Sin embargo, los tipos asignados por el sistema Parsytec en ocasiones no se corresponden con éstos aunque se hayan generado de forma periódica. Por ejemplo, si los defectos individuales de un mismo defecto periódico son muy pequeños, podrían ser fácilmente identificados como de tipo "Agujero". Esto puede llevarnos a la conclusión de que, aunque el tipo asignado por el sistema Parsytec a los defectos individuales pertenecientes a un mismo defecto periódico no sea "Marcas de cilindro" o "Mosaico", todos tienen que ser iguales. Si la morfología del defecto periódico es fácilmente identificable por el sistema Parsytec, todos deberían ser etiquetados con el mismo tipo, aunque existen muchos casos en los que esto no es así. Por este motivo, debería dejarse a elección del usuario permitir sólo agrupaciones de defectos individuales que hayan sido etiquetados por el sistema Parsytec como del mismo tipo, o permitir agrupaciones heterogéneas.

El último factor importante a determinar es el instante en que la búsqueda debe ser detenida. Si en el momento en que no se encuentre un defecto individual dentro de su correspondiente área de búsqueda ya se da por hecho que no va a haber más y se detiene la búsqueda, se podría estar cometiendo un error en muchos casos. Puede darse el caso de que el siguiente defecto individual a buscar de la secuencia periódica no se haya detectado en la fase de inspección, o que su detección haya sido incorrecta y esté situado fuera del área de búsqueda. Por ello, es necesario modificar el algoritmo para permitir búsquedas infructuosas sin que ésta se detenga. Si en un momento dado se busca un defecto individual en la posición (x, y) y no se encuentra ninguno dentro de su área de búsqueda correspondiente, se continuaría buscando el siguiente dentro del área de búsqueda centrada en el punto $(x + periodo, y)$. Si vuelve a darse el caso de que no haya ningún defecto en dicho área, se continuaría en el área centrada en $(x + 2 \cdot periodo, y)$, y así sucesivamente hasta superar un número máximo de búsquedas infructuosas consecutivas. Este valor, al igual que las tolerancias, debe ser fijado de antemano. Si fuese muy pequeño, podrían quedar defectos sin detectar, y si es muy grande, se aumenta la probabilidad de incluir en el defecto periódico defectos individuales que no formen parte de él, por lo que debe ser elegido con cuidado.

Por tanto, para que el algoritmo sea parametrizable y, por tanto, capaz de tolerar las dificultades propias del procesamiento de imágenes en tiempo real y de la agrupación de defectos individuales pertenecientes a un mismo defecto periódico, debería permitir que se varíen los siguientes valores:

- Número mínimo de defectos individuales que pueden ser agrupables: *MinDefs*.
- Número máximo de no-apariciones consecutivas de defectos individuales: *MaxSkips*.
- Relación entre la anchura de los defectos individuales ya agrupados y el siguiente defecto individual a agrupar: *WidRatio*.
- Relación entre la longitud de los defectos individuales ya agrupados y la del siguiente defecto individual a agrupar: *LenRatio*.
- Relación entre el área en *pixels* de los defectos individuales ya agrupados y el del siguiente defecto individual a agrupar: *ARatio*.
- Tolerancia transversal para la posición del siguiente defecto individual a agrupar (en torno a la posición transversal promedio los defectos individuales ya agrupados): *TTol*.
- Relación entre la separación entre dos defectos individuales consecutivos y el periodo teórico del cilindro cuyos defectos periódicos se buscan: *YRatio*.
- Agrupación de defectos individuales de tipos homogéneos o heterogéneos: *SType*.

De este modo, se obtiene un algoritmo basado en el método de *backtracking* adaptado al problema que se pretende resolver. El siguiente paso es poner en funcionamiento el algoritmo. Para ello es necesario realizar una serie de experimentos que permitan determinar los valores más adecuados para cada uno de estos parámetros.

Capítulo 6

Valoración de la calidad de la detección y caracterización de defectos periódicos

Una vez que se dispone de una implementación del algoritmo propuesto, se ha de comprobar que funciona correctamente. En muchos problemas relacionados con la informática, el resultado de una comprobación de este tipo es binario: funciona o no funciona. Desgraciadamente, no es el caso de la caracterización de defectos periódicos, y tampoco lo es, en general, en el caso de cualquier *software* dedicado al reconocimiento de patrones. Lo normal es que la salida generada por este tipo de algoritmos no sea totalmente errónea ni totalmente correcta, si no que se halle en un término medio. Es esencial para su evaluación o posterior optimización dar una nota o calificación a la salida proporcionada para un determinado problema. De este modo, se puede comparar cuantitativamente el resultado proporcionado por dos versiones distintas del algoritmo, por dos herramientas distintas o comprobar si una modificación en ella ha mejorado o empeorado los resultados. Asimismo, en el caso de que el algoritmo esté gobernado por un conjunto de parámetros de configuración, éstos pueden ser optimizados asignándoles los valores que maximicen dicha calificación. En este capítulo se va a introducir el concepto de *métrica*, y como éstas pueden utilizarse para valorar la calidad de las soluciones devueltas por algoritmos de clasificación o detección. Más concretamente, se estudiará el caso de la evaluación de la detección y caracterización de los defectos periódicos, qué tipos de métricas son aplicables a este problema y cuáles de ellas serán finalmente utilizadas durante la fase de experimentación.

6.1. Conceptos Generales

Una métrica puede definirse como una medida de bondad de un *software*, de un algoritmo o de la salida proporcionada por éstos. Disponer de un valor que cuantifique la bondad de un algoritmo es esencial para su mejora u optimización,

ya que permite realizar cambios o ajustes orientados siempre a maximizar este valor. En el estudio sobre distintos métodos de evaluación realizado por [Zhang, 1996], se clasifica a las distintas métricas según si se obtienen a partir de las características del propio algoritmo que se va a evaluar (métodos analíticos) o a partir de los resultados que éste genera (métodos empíricos). A su vez, los métodos empíricos se dividen en dos grupos:

- Métodos empíricos basados en la calidad de la solución (*Empirical Goodness Methods*): Devuelven un valor basándose únicamente en la solución generada, analizando si la solución posee ciertas características (éstas dependen de cada problema concreto).
- Métodos empíricos basados en discrepancias (*Empirical Discrepancy Methods*): Devuelven un valor comparando la solución generada con una referencia (*ground truth*), la cual se supone perfecta. Normalmente dicha referencia la crea un usuario experto en la materia y define el objetivo al que debe llegar la herramienta evaluada.

Para el caso de la detección y caracterización de defectos periódicos, se van a utilizar métodos empíricos basados en discrepancias para evaluar el algoritmo propuesto, es decir, sólo se va tener en cuenta el resultado proporcionado por éste comparándolo siempre con una referencia. Como ya se comentó anteriormente, en pocos casos la caracterización obtenida de forma automática será perfecta o totalmente incorrecta, si no que permanecerá en un punto medio, que estará más o menos cercano a uno de estos dos extremos. El primer aspecto que debe determinarse en una métrica, es el rango de valores que ésta puede tomar. Una opción es utilizar el rango $[0 - 1]$, asignando el valor 0 cuando el resultado es totalmente incorrecto, y un valor 1 cuando es perfecto. Para el resto de los casos, la métrica tomará un valor real comprendido en el intervalo $(0 - 1)$. Utilizando métodos empíricos basados en discrepancias, hay que analizar las diferencias entre la referencia utilizada y la solución generada por la herramienta. En el caso de la detección y caracterización de defectos periódicos, se debe analizar la diferencia entre la caracterización automática y la realizada por un humano utilizando la herramienta descrita en el apartado 4.3.

En general, cualquier tipo de clasificador debe asignar a cada elemento del problema una de las k clases distintas a las que puede pertenecer. Por ejemplo, el módulo de procesamiento de imágenes del Sistema Parsytec debe decidir, para cada defecto individual detectado, a que tipo de defecto pertenece de entre todos los que han sido definidos por el sistema (agujero, arañazo, marca de cilindro, etc.). En el problema de la detección y caracterización de defectos periódicos esta elección puede ser, por ejemplo, para cada defecto individual, asignarle uno de los cilindros de trabajo (o ninguno, si no fuera parte de un defecto periódico). Por lo tanto, toda la información acerca de las decisiones tomadas

por el algoritmo de caracterización puede resumirse en una matriz cuadrada C de dimensión k , comúnmente denominada *matriz de confusión*. La dimensión de la matriz de confusión se corresponde con el número de clases distintas entre las que se puede elegir. El contenido de la posición c_{ij} de la matriz representa el número de elementos de tipo i clasificados como de tipo j , la suma de todos los elementos de la fila i de la matriz representa el total de elementos que realmente pertenecen a la clase i y la suma de todos los elementos de la columna j de la matriz representa el total de elementos que han sido clasificados como de tipo j . Utilizando esta notación, sólo los elementos de la diagonal principal de la matriz se corresponden con aciertos del clasificador, como se puede observar en la tabla 6.1, donde se representa la matriz de confusión de un problema de clasificación donde existen tres clases (0,1 y 2).

| | | Clasificado como: | | |
|--------|---|-------------------|---------|---------|
| | | 0 | 1 | 2 |
| Clase: | 0 | Acierto | Fallo | Fallo |
| | 1 | Fallo | Acierto | Fallo |
| | 2 | Fallo | Fallo | Acierto |

Tabla 6.1: Matriz de confusión genérica

El objetivo de cualquier métrica empírica basada en discrepancias será combinar el contenido de cada uno de los elementos de la matriz para devolver un valor real comprendido en el intervalo $[0 - 1]$ que resuma de la mejor forma posible la calidad de la clasificación realizada.

6.2. Métodos de contabilización de aciertos y fallos

Según lo introducido en el apartado anterior, el valor de una métrica obtenida mediante métodos empíricos basados en discrepancias se calcula combinando de un determinado modo el contenido de los distintos elementos de una matriz de confusión. Para que pueda realizarse este cálculo, tiene que estar perfectamente establecido cuales son *elementos* del problema (los elementos que van a ser contabilizados como *un acierto* o *un fallo*) y las clases a las que éstos pueden pertenecer. Tanto en el *ground truth* como en una solución generada por el algoritmo, cada elemento está asociado o *clasificado* como de una determinada clase. Si la clase asociada a un elemento es la misma en el *ground truth* y en la solución, se considera un acierto, y en caso contrario un fallo. Dependiendo de cuales sean los elementos y cuales sean las clases la matriz de confusión sera

diferente, es decir, tendrá diferentes dimensiones y el contenido de cada una de sus celdas tendrá un significado distinto. En esta sección se exponen distintos modos de crear las matrices de confusión, considerando distintos elementos y distintas clases. Este hecho puede suponer un problema a la hora de seleccionar una métrica que utilice una matriz de confusión para generar un valor en el intervalo $[0 - 1]$, puesto que las dimensiones de ésta pueden ser distintas dependiendo de los elementos y las clases utilizadas. Por este motivo, las métricas que se propongan proporcionarán un valor en el intervalo $[0 - 1]$ combinando los valores correspondientes a cuatro situaciones de clasificación diferentes. Cada una de estas situaciones es la suma de las celdas de la matriz de confusión con un mismo valor semántico, o dicho de otro modo, celdas que representan el mismo tipo de acierto o el mismo tipo de fallo. De este modo, las métricas elegidas finalmente para valorar la calidad de las detecciones podrán ser aplicadas independientemente de cuales sean los elementos elegidos o el número de clases que existan para clasificarlos (y por tanto, las dimensiones de la matriz de confusión). Para cada uno de los métodos presentados en esta sección para contabilizar los aciertos y los fallos, se muestra un ejemplo de la matriz de confusión generada, y las distintas situaciones que se pueden dar en función del tipo de acierto o del tipo de fallo. Normalmente éstas son cuatro: *cierto positivo*, *falso positivo*, *falso negativo* y *cierto negativo* (esta última situación no existe en algunos casos).

El algoritmo desarrollado realiza una detección y caracterización de los defectos periódicos de una banda de acero. Por detección se entiende que la presencia de un defecto periódico ha sido advertida, mientras que por caracterización se entiende la obtención de ciertas características que definen ese defecto periódico, como el número de defectos individuales que lo componen, mayor número de defectos individuales no detectados consecutivamente, periodo (y por tanto el cilindro de trabajo que lo generó), etc. Los distintos métodos de contabilización de aciertos y fallos pueden hacerse en base a la detección o a la caracterización de los defectos periódicos detectados en una banda. Un ejemplo de método basado en detección podría ser uno que contabilice como acierto el haber detectado un defecto periódico (sin importar lo parecido que sea el defecto periódico encontrado con el defecto periódico real). Por otra parte, un método basado en la caracterización podría ser uno que contabilice como acierto la detección de un defecto periódico si una o varias de sus características se corresponden con la realidad. Por ejemplo, si el método se basa en la característica *periodo*, sólo contabilizará como acierto la detección de un defecto periódico si el periodo asignado por el algoritmo se corresponde con el periodo real de dicho defecto periódico.

El algoritmo desarrollado realiza una búsqueda de defectos periódicos por banda, agrupando un conjunto de defectos individuales dentro de cada defecto periódico. Por tanto, puede contabilizarse como acierto el haber clasificado correctamente una banda, un defecto periódico o un defecto individual. Puesto

que las clases a las que pueden pertenecer estos elementos varían en función de si dichas contabilizaciones se basan en la detección o caracterización, surgen en total 7 tipos de contabilización distintos.

6.2.1. Contabilización por banda

Utilizar las bandas como elementos es el modo más generalista en el que se puede realizar la contabilización de los aciertos y los fallos en este problema. En este caso, sólo se tiene en cuenta la detección de los defectos periódicos de cada banda. Cada banda puede tener o no tener defectos periódicos, y puede ser clasificada como que tiene defectos periódicos o como que no los tiene (sin importar cuantos son, ni qué cilindro los generó).

Supóngase el caso en el que se tiene un conjunto de 50 bandas, de las cuales 30 tienen defectos periódicos (sin importar el cilindro de trabajo que los haya generado) y las otras 20 no los tienen. Tras utilizar una herramienta de caracterización, de las 30 bandas que tienen defectos 26 se han clasificado correctamente, mientras que en las otras 4 no se encontró ningún defecto periódico. Para las 20 bandas sin defectos periódicos, la herramienta de caracterización halló defectos periódicos en 2 de ellas y ninguno en el resto. La matriz de confusión obtenida sería la siguiente se muestra en la tabla 6.2.

| | | Clasificado como: | |
|--------|---------------|-------------------|---------------|
| | | Con Def. Per. | Sin Def. Per. |
| Clase: | Con Def. Per. | 26 | 4 |
| | Sin Def. Per. | 2 | 18 |

Tabla 6.2: Matriz de confusión de contabilización por banda

La suma del contenido de todas las celdas de la primera fila indican el número de bandas que realmente tienen defectos periódicos, mientras que la suma del contenido de todas las celdas de la primera columna indican el número de bandas a las que la herramienta detectó algún defecto periódico. Del mismo modo, la suma del contenido de todas las celdas de la segunda fila indican el número de bandas que no tienen ningún defecto periódico, mientras que la suma del contenido de todas las celdas de la segunda columna indican el número de bandas para las cuales la herramienta no encontró ningún defecto periódico. Las bandas incluidas en las celdas de la diagonal principal (celdas c_{11} y c_{22}) son aquellas para las cuales la herramienta ha acertado, mientras que las incluidas en las celdas de la diagonal secundaria (celdas c_{12} y c_{21}) son aquellas para las cuales ha fracasado. Concretamente, estas cuatro celdas se corresponden con las siguientes cuatro situaciones:

- Una banda contiene defectos periódicos y fue clasificada correctamente como una banda con defectos periódicos: Este caso se considera un acierto, y se denomina *cierto positivo* o *true positive* (en lo sucesivo mediante las siglas TP). El número de bandas que se correspondan con esta situación se muestra en la celda c_{11} de la matriz de confusión.
- Una banda contiene defectos periódicos y fue clasificada incorrectamente como una banda sin defectos periódicos: Este caso se considera un fallo, y se denomina *falso negativo* o *false negative* (en lo sucesivo mediante las siglas FN). El número de bandas que se correspondan con esta situación se muestra en la celda c_{12} de la matriz de confusión.
- Una banda no contiene defectos periódicos y fue clasificada incorrectamente como una banda con defectos periódicos: Este caso se considera un fallo, y se denomina *falso positivo* o *false positive* (en lo sucesivo mediante las siglas FP). El número de bandas que se correspondan con esta situación se muestra en la celda c_{21} de la matriz de confusión.
- Una banda no contiene defectos periódicos y fue clasificada correctamente como una banda sin defectos periódicos: Este caso se considera un acierto, y se denomina *cierto negativo* o *true negative* (en lo sucesivo mediante las siglas TN). El número de bandas que se correspondan con esta situación se muestra en la celda c_{22} de la matriz de confusión.

Utilizar este tipo de contabilización para entrenar la herramienta de caracterización desarrollada implicaría tener en cuenta sólo el hecho de detectar la existencia o no existencia de defectos periódicos, sin importar qué cilindro o cilindros han generado esos defectos periódicos y qué cilindros indica la herramienta que han sido los que los han generado. Igualmente, el resto de características de los defectos periódicos tampoco son tenidos en cuenta. Además, se trabaja con una detección a nivel de banda, es decir, para que la clasificación de una banda que tiene defectos periódicos sea considerada un acierto, es suficiente con detectar solamente uno de ellos (podría tener varios). De este modo, en muchos casos la herramienta podría generar una alarma por haber detectado un defecto periódico producido por un determinado cilindro de trabajo, cuando en realidad ningún defecto periódico presente en esa banda ha sido generado por él. Este caso también sería considerado como un acierto. Si se diera este caso en la planta industrial una vez instalada la herramienta, los operadores podrían detener la laminación debido a la alarma generada, encontrando el problema en un cilindro distinto al indicado. Aunque esta detención no tenga efectos económicos adversos (al no ser el caso de detener la producción sin que exista defecto o no detenerla cuando sí exista) reduce la productividad, ya que implica que los trabajadores estarán obligados a inspeccionar todos los cilindros cada vez que

se detenga la producción, ya que la información proporcionada a este respecto por la herramienta no es fiable.

Adicionalmente, la información generada por la herramienta podría ser incompleta, ya que en el caso de que existan dos (o más) defectos periódicos diferentes para un mismo cilindro de trabajo, se seguiría considerando como éxito el encontrar sólo uno de ellos. Por este motivo, en todos los casos sería necesario realizar una inspección de todos los cilindros de trabajo, por si existieran defectos periódicos generados por algún otro cilindro de los indicados por la herramienta. Para evitar este tipo de problemas, se debería realizar una contabilización de los aciertos y los fallos que valorase más positivamente los casos en los que fueron encontrados todos los defectos periódicos existentes en la banda.

6.2.2. Contabilización por defecto periódico

Un problema importante que se deriva de la contabilización de aciertos y fallos por banda, es la poca información que se obtiene acerca de la calidad de la detección realizada por la herramienta. Para una banda concreta, cualquier métrica que utilice ese tipo de contabilización devolverá el valor 0 en caso de que la haya clasificado mal, ó 1 en caso de que la haya clasificado bien, pero en ningún caso se puede saber a partir de estos valores lo distinto o parecido que es la detección realizada por la herramienta de la realidad. Para poder tener una idea de lo bien o mal que funciona la herramienta, sería necesario contar con un elevado conjunto de bandas y combinar los valores que una métrica devolviera para cada una de ellas. En el caso de realizar la contabilización por defecto periódico se obtiene una mayor información acerca de la calidad de la detección realizada para cada banda, es decir, se podría comprobar si realiza una mejor detección para bandas con mayor o menor número de defectos, o para bandas de uno u otro material, o de un modo más general, si realiza una mejor caracterización para aquellas bandas que tienen en común una cierta característica.

En este caso, la contabilización de los aciertos y los fallos se realiza comparando los defectos periódicos detectados por la herramienta y los que realmente tiene la banda. El elemento de estudio es, por tanto, un defecto periódico, y las distintas clases en las que éstos pueden clasificarse se corresponden con los distintos cilindros de trabajo existentes en el tren de laminación además de una clase adicional utilizada para los casos en los que no exista defecto periódico. En el caso de la planta de Arcelor-Mittal de Avilés, el tren de laminación presenta 7 cajas de cilindros de trabajo, por tanto, la matriz de confusión en este caso sería de dimensión 8×8 . Supongamos que una banda tiene 4 defectos periódicos, dos de ellos del cilindro 6, uno del cilindro 5 y otro del cilindro 4. De los dos defectos periódicos provocados por el cilindro 6 uno fue clasificado correctamente como generado por dicho cilindro, mientras que al otro se le asoció al cilindro 5. El defecto periódico generado por el cilindro 5 fue asociado correctamente al

cilindro 5, y el que fue generado por el cilindro 4 no fue detectado. Además, la herramienta a evaluar detectó incorrectamente un defecto periódico asociado al cilindro 4 que en realidad no existe (se puede determinar que este defecto periódico es distinto del que realmente fue generado por el cilindro 4 si alguna de sus características son incompatibles, por ejemplo, si están situados posiciones transversales distintas). La matriz de confusión obtenida en este caso particular sería la mostrada en la tabla 6.3.

| | | Clasificado como: | | | | | | | |
|--------|-------------|-------------------|---|---|---|---|---|---|-------------|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Inexistente |
| Clase: | 0 | | | | | | | | |
| | 1 | | | | | | | | |
| | 2 | | | | | | | | |
| | 3 | | | | | | | | |
| | 4 | | | | | | | | 1 |
| | 5 | | | | | | 1 | | |
| | 6 | | | | | | 1 | 1 | |
| | Inexistente | | | | | 1 | | | |

Tabla 6.3: Matriz de confusión de contabilización por defecto periódico

Las celdas vacías de la matriz contienen un valor 0. En el caso de que la banda no presente ningún defecto periódico, la única fila que puede tener celdas con valores distintos de 0 es la última. En ese caso, la única posibilidad de acierto por parte de la herramienta de caracterización es no encontrar ninguno. En el caso de bandas sin ningún defecto periódico, para cada defecto detectado por la herramienta asociado al cilindro k , se sumaría una unidad a la posición de la matriz c_{8k} (última fila, k -ésima columna).

En este caso, los defectos periódicos incluidos en las celdas de la diagonal principal son (como en el caso anterior) los aciertos, mientras que el resto de celdas se utilizan para contabilizar los fallos. Para cada defecto periódico se produce alguna de las siguientes situaciones:

- Un defecto periódico existente en la banda fue detectado correctamente: Este caso se considera un acierto y el defecto es TP.
- Un defecto periódico existente en la banda no ha sido detectado: Este caso se considera un fallo, y el defecto es FN.

- La herramienta ha detectado un defecto periódico que no se corresponde con ninguno de los defectos periódicos existentes en la banda: Este caso se considera un fallo, y el defecto es FP.

Utilizando este método de contabilización no existe la situación de TN, ya que no tiene sentido afirmar que la herramienta no ha detectado defectos periódicos que no existen. En la tabla 6.4 se muestran los elementos de la matriz de confusión que se corresponden con cada una de estas tres situaciones.

| | | Clasificado como: | | | | | | | | |
|--------|-------------|-------------------|----|----|---|----|----|---|-------------|----|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Inexistente | |
| Clase: | 0 | | | | | | | | | |
| | 1 | | | | | FN | | | | |
| | 2 | | | | | / | | | | |
| | 3 | | FN | | | | FP | | | FN |
| | 4 | | / | | | | | | | |
| | 5 | | | FP | | | | | | |
| | 6 | | | | | | | | | |
| | Inexistente | | | | | | | | FP | TP |

Tabla 6.4: Situaciones de detección en la contabilización por defecto periódico

Cabe destacar las celdas de la matriz pintadas de rojo, que se corresponden con los defectos periódicos que han sido detectados, pero cuya caracterización es incorrecta, en el sentido de que ha sido clasificado como un defecto periódico producido por un cilindro de trabajo incorrecto. Estos casos son, según las situaciones definidas anteriormente, un FP y un FN al mismo tiempo. Supóngase el caso de que exista un defecto periódico generado por el cilindro 6 y que ha sido caracterizado por la herramienta como producido por el cilindro 5. Cuando se compare la detección de la herramienta con el *ground truth*, se tiene un defecto periódico generado por el cilindro 6 que no está en el *ground truth* (FP), y un defecto periódico generado por el cilindro 5 que no está en la detección (FN). El sentido que tiene la *doble penalización* de este tipo de casos es que sus consecuencias pueden ser muy negativas, ya que podría detenerse la producción para sustituir un cilindro de trabajo que está en buen estado y no sustituir el dañado, que seguiría generando defectos periódicos en las siguientes bandas que se laminasen. Por tanto, se tiene un impacto negativo en la productividad de haber detenido la producción inútilmente (puesto que no se solucionó el problema) y un impacto económico negativo al laminar más bandas con defectos que

habrán de ser deshechadas.

A diferencia de la contabilización por banda, en este caso se tiene en cuenta tanto la detección como la caracterización de los defectos periódicos. Aunque en las situaciones descritas se habla de detección, es necesario utilizar al menos dos características de los defectos periódicos detectados para poder determinar si se corresponden con alguno de los defectos periódicos del *ground truth*: el periodo (que determina de forma inconfundible al cilindro de trabajo que generó ese defecto) y la posición transversal. El resto de características podrían ser utilizadas para ayudar a realizar una valoración más precisa, donde las métricas utilizadas otorguen una puntuación mayor a aquellas detecciones de defectos periódicos que sean más parecidas al *ground truth*. Como las métricas calculan el valor devuelto en función de TP, FN y FP (en este caso no hay TN), los aciertos y los fallos podrían contabilizarse para que las métricas utilizadas funcionen de este modo. Según el ejemplo anterior, cuya matriz de confusión se muestra en la tabla 6.3, cada defecto periódico suma un valor de 1 al contenido de una celda de la matriz (y por consiguiente, al número total de defectos periódicos pertenecientes a la categoría de TP, FN o FP). En lugar de otorgar siempre valores iguales a 1, podría ser adecuado utilizar números reales en el intervalo $[0 - 1]$ a alguno (o todos) los defectos periódicos. De este modo, se proponen tres modos distintos de contabilizar los aciertos y fallos por defecto periódico, los cuales se describen a continuación.

6.2.2.1. Contabilización binaria

La contabilización binaria es el tipo más simple. Cada defecto periódico (tanto los que realmente existen en la banda como los que se han detectado incorrectamente sin que existan en realidad) suma un valor 1 a la cuenta de TP, FN o FP (y a su correspondiente celda de la matriz de confusión). La única ventaja real que tiene utilizar este tipo de contabilización es su sencillez, pero tiene sus inconvenientes. El más evidente es que un defecto periódico detectado correctamente, siempre es contabilizado como un 1 en la cuenta de TP, independientemente de lo buena que sea su caracterización.

En el ejemplo ilustrado en la figura 6.1 se tiene un defecto periódico constituido por 7 defectos individuales (las estrellas de color rojo) y además de éstos, la banda cuenta con otros dos defectos individuales no pertenecientes a ese defecto periódico (las estrellas de color azul). La herramienta A detectó el defecto periódico con los 7 defectos individuales, la herramienta B detectó el defecto con 6 defectos individuales y la herramienta C encontró sólo 4 de los defectos individuales. Además, la herramienta de caracterización B añadió al defecto periódico dos defectos individuales que no le pertenecen. Es evidente que la detección A es la mejor de las tres. Dependiendo del modo en que influya negativamente el incluir defectos individuales que no pertenecen al defecto periódico o el dejar

defectos individuales sin incluir, será peor la detección B o la detección C. Sin embargo, utilizando una contabilización binaria, en todos estos casos se sumaría un 1 a la celda correspondiente de la matriz de confusión y también a la cuenta de TP, cuando sería más adecuado dar un valor mayor a la detección A que a cualquiera de las otras dos.

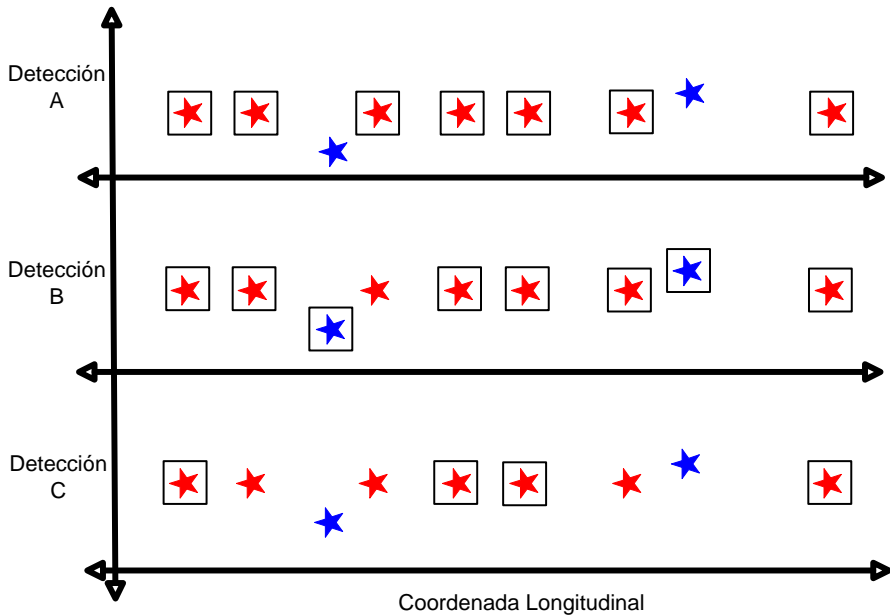


Figura 6.1: Distintos grados de detección de un defecto periódico

Una situación similar se da en los defectos periódicos FN y FP. Si una banda cuenta con dos defectos periódicos, uno de ellos con 200 defectos individuales y el otro con 10, se tiene en cuenta del mismo modo la no detección del primero como la no detección del segundo, cuando el defecto periódico más grande supone un problema mayor en la laminación de bandas de acero. Por otra parte, si una herramienta de caracterización detecta un defecto periódico que no existe y le asocia un conjunto de 20 defectos individuales, este fallo es menor (y debería ser cuantificado como tal) que si se le hubiera asociado un conjunto de 50 defectos individuales.

Este tipo de contabilización cuenta con la ventaja de la simplicidad y, además, ofrece más información que la contabilización por banda. La contabilización por banda proporciona un valor de 0 (fallo) ó 1 (acierto) para cada banda en función de si ésta había sido clasificada correctamente o no. La contabilización

por defecto periódico binaria, proporcionara un valor perteneciente al intervalo $[0 - 1]$ en función de la similitud de los defectos periódicos detectados y los que hay en el *ground truth*. Puesto que este modo de contabilizar los defectos periódicos penaliza los casos en los que ha sido determinado incorrectamente el cilindro de trabajo que genera los defectos periódicos, una herramienta entrenada utilizando este tipo de contabilización determinaría qué cilindro de trabajo está defectuoso de un modo más preciso que en el caso de la contabilización por banda.

6.2.2.2. Contabilización híbrida

Con el objetivo de realizar una valoración de la detección más precisa, es necesario modificar el modo de contabilización de aciertos y fallos para evitar problemas como los comentados en el apartado anterior con la contabilización binaria. Cuando un defecto periódico que ha sido detectado también está en el *ground truth*, en lugar de sumar un 1 a la cuenta de defectos TP, se sumará un valor en el intervalo $[0 - 1]$ dependiendo de lo parecida que sea la caracterización del defecto periódico detectado y el defecto periódico real. Teniendo en cuenta los defectos individuales pertenecientes a los defectos periódicos, se guiará el proceso de optimización del algoritmo de detección de la herramienta de caracterización para que agrupe el mayor número de defectos individuales posible que realmente pertenecen a cada defecto periódico. De este modo, cuando un trabajador de la planta de Arcelor-Mittal compruebe que se ha generado un defecto periódico de 20 defectos individuales, podrá estar seguro de que ese defecto periódico tiene un número de defectos individuales relativamente pequeño, siendo improbable el caso de que tenga 200 y sólo hayan sido encontrados 20 (cosa que podría ocurrir entrenando la herramienta mediante una contabilización de aciertos y fallos como las mencionadas anteriormente).

Para lograr este objetivo, una vez que se haya comprobado que tanto la posición transversal como el periodo de un defecto detectado se corresponden con la posición transversal y el periodo de un defecto periódico que existe en el *ground truth* de la banda, es necesario analizar los defectos individuales que la herramienta ha incluido dentro de ese defecto periódico y compararlos con los defectos individuales que tiene en el *ground truth*. Al realizar dicha comparación, para cada defecto periódico, cada defecto individual puede encontrarse en una de las siguientes situaciones:

- El defecto individual pertenece al defecto periódico y además fue incluido en ese mismo defecto periódico por la herramienta. Este caso se considera un acierto, y el defecto individual se denomina *cierto positivo individual* o *individual true positive* (en lo sucesivo mediante las siglas ITP).
- El defecto individual pertenece al defecto periódico, pero no fue incluido

en ese mismo defecto periódico por la herramienta. Este caso se considera un fallo, y el defecto individual se denomina *falso negativo individual* o *individual false negative* (en lo sucesivo mediante las siglas IFN).

- El defecto individual fue incluido en el defecto periódico por la herramienta, pero no pertenece realmente a él. Este caso se considera un fallo, y el defecto individual se denomina *falso positivo individual* o *individual false positive* (en lo sucesivo mediante las siglas IFP).
- El defecto individual no fue incluido en el defecto periódico por la herramienta, y no pertenece realmente a él. Este caso se considera un acierto, y el defecto individual se denomina *cierto negativo individual* o *individual true negative* (en lo sucesivo mediante las siglas ITN).

El modo en el que una determinada métrica produce un valor en el intervalo $[0 - 1]$ para cada banda es combinando de algún modo los valores de TP, FN, FP y TN (si existe). Se puede considerar que la pertenencia de un elemento a uno de estos cuatro grupos es binaria (pertenece o no pertenece). Al otorgar un valor comprendido en el intervalo $[0 - 1]$ a los defectos periódicos detectados correctamente combinando los valores de ITP, IFN, IFP e ITN, esta asociación ya no sería binaria, si no borrosa (*fuzzy*), como ya hace [Usamentiaga *et al.*, 2006] con algoritmos de segmentación. De este modo, un defecto periódico detectado correctamente cuya caracterización se valore con un 0.6, sumaría 0.6 a la cuenta de TP en lugar de 1, como se haría con una contabilización binaria. En este caso se podría decir que se ha detectado el defecto *parcialmente*, con lo cual, para mantener la coherencia, la el resto del defecto periódico debería considerarse como no detectado, y por tanto, se añadiría el 0.4 restante a la cuenta de FN. El añadir el resto a la cuenta de FN es necesario para que las métricas puedan combinar adecuadamente los valores de TP, FN y FP. Si éstos valores se utilizaran para calcular el tanto por uno de defectos periódicos detectados correctamente, se utilizaría una expresión como 6.1.

$$M = \frac{TP}{TP + FN + FP} \quad (6.1)$$

Supóngase el caso de una banda que sólo tiene un defecto periódico. Una herramienta de detección detectó ese defecto periódico y ninguno más, y la caracterización de dicho defecto periódico tiene un valor de 0.6. El valor de TP sería, por tanto, 0.6, pero al ser FP y FN igual a cero, el valor de esa expresión sería 1, con lo cual no se tendría en cuenta el hecho de que el defecto periódico se ha detectado parcialmente (de hecho se obtendría siempre un 1, independientemente del valor de caracterización). Sin embargo, si el valor de FN fuese 0.4 (el resto del defecto periódico, o la parte del defecto periódico

no detectada), el valor de M de la expresión 6.1 sería 0.6, teniéndose ahora en cuenta el valor de la caracterización del defecto periódico.

6.2.2.3. Contabilización real

En el caso de la contabilización híbrida, un defecto periódico TP es contabilizado como un valor en el intervalo $[0 - 1]$ en función de su proximidad con la realidad, mientras que los defectos periódicos FN y FP cuentan siempre con un valor de 1, independientemente de sus defectos individuales. Puesto que los defectos de estas dos categorías son los que se consideran fallos en la detección, parece razonable pensar que un FP constituido por 60 defectos individuales debe tener una influencia negativa mayor en el cálculo de la métrica que un FP constituido por 10. De igual modo, un defecto periódico no detectado (FN) debería influir más negativamente en el cálculo de la métrica cuanto mayor sea el número de defectos individuales que lo constituyen. Por tanto, cada defecto periódico FN o FP debería contabilizarse con un valor de 0 ó próximo a 0 cuando el número de defectos individuales que lo constituyen sea bajo y contabilizarse con un valor de 1 ó próximo a 1 cuando el número de defectos individuales que lo constituyen sea alto. Una función sencilla que cumple estos requisitos es un tipo de exponencial negativa (6.2). Otra función muy utilizada en informática es la función sigmoide (6.3), cuya aplicación más conocida es la de función de activación en redes neuronales artificiales [Simpson, 1990].

$$EN(n, c, r) = 1 - e^{-\frac{n+c}{r}} \quad (6.2)$$

$$Sig(n, c, r) = \frac{1}{1 + e^{-r(n-c)}} \quad (6.3)$$

Aunque en las redes neuronales la función sigmoide utilizada está centrada en 0 y su recorrido es el intervalo $[-1, 1]$, ésta ha sido ligeramente modificada para que se ajuste a los requisitos del problema (aunque manteniendo su característica forma de “S”). En las funciones definidas en (6.2) y (6.3) la variable n se corresponde con el número de defectos individuales que constituyen el defecto periódico FN o FP que se pretende evaluar, mientras que c y r son dos parámetros de configuración de las funciones, donde c denota el centro de la función y r la rapidez. En el caso de la exponencial negativa representada en la figura 6.2(a), el centro indica el valor de la variable donde la función corta al eje de abscisas y en el caso de la función sigmoide, representada en la figura 6.2(b), indica el punto de inflexión de la función. En ambas funciones, la rapidez fija la velocidad a la que las funciones se acercan asintóticamente a 1. En la figura 6.2 se representan estas dos funciones con distintos valores para los parámetros c y r . En las figuras 6.2(c) y 6.2(d) tienen modificado el centro respecto a las

figuras 6.2(a) y 6.2(b), y en las figuras 6.2(e) y 6.2(f) tienen modificada la rapidez. Estableciendo un valor adecuado a estos parámetros, se pueden valorar los defectos periódicos FP y FN del modo que se desee.

Mediante este tipo de contabilización, se puede hacer una valoración más precisa del resultado proporcionado por una herramienta de detección. Con la contabilización de aciertos y fallos por banda o contabilización binaria por defecto periódico, no importa si para un defecto periódico constituido por 100 defectos individuales la herramienta consiguió detectarlo y caracterizarlo incluyendo en él 10 de ellos, o los 100. Aunque en ambos casos se generaría la alarma correspondiente al haber sido detectado un defecto periódico, los trabajadores de la planta le darían una mayor credibilidad si se trata de un defecto periódico constituido por un gran número de defectos individuales que si se tratase de un defecto periódico muy pequeño constituido por una decena de ellos o menos. Las contabilizaciones híbridas y reales por defecto periódico, pueden ser utilizadas por una métrica para guiar el entrenamiento de la herramienta de detección de tal modo que las detecciones que realice la herramienta entrenada sean más precisas. Esto significa que en un mayor número de ocasiones el cilindro asociado a los defectos periódicos por la herramienta será el correcto, y el conjunto de defectos individuales que lo componen será más parecido al conjunto real. Además, en el caso de la contabilización real por defecto periódico, se evita dar demasiada importancia a los defectos periódicos FN y FP que sean muy pequeños (constituidos por pocos defectos individuales) de tal modo que se considera más grave no encontrar un defecto periódico cuanto mayor sea éste (utilizando las contabilizaciones binarias o híbridas, un defecto FP o FN de tan sólo 4 defectos individuales tenía el mismo peso que uno de 200). De este modo se consigue que la herramienta no detecte de más (inventando defectos periódicos que no existen), ni de menos (dejando defectos que sí existen sin detectar), si no que se sitúa en un punto intermedio que permite minimizar ambos problemas al mismo tiempo.

6.2.3. Contabilización por defecto individual

El último tipo de contabilización es el centrado únicamente en los defectos individuales. En este caso, el elemento de estudio es cada uno de los defectos individuales presentes en una misma banda. Según las clases en que éstos pueden clasificarse daría lugar a tres subtipos de diferentes. En uno de ellas, se utilizarían las mismas 8 clases que en el caso de la contabilización por defecto periódico, es decir, una para cada cilindro de trabajo y otra más para el caso de que no pertenezca a ningún defecto periódico. Con el segundo subtipo, las clases serían cada uno de los defectos periódicos que realmente existen en la banda. De este modo, sólo se considera un acierto a aquellos defectos individuales a los que se les ha asignado correctamente tanto el cilindro de trabajo que los generó,

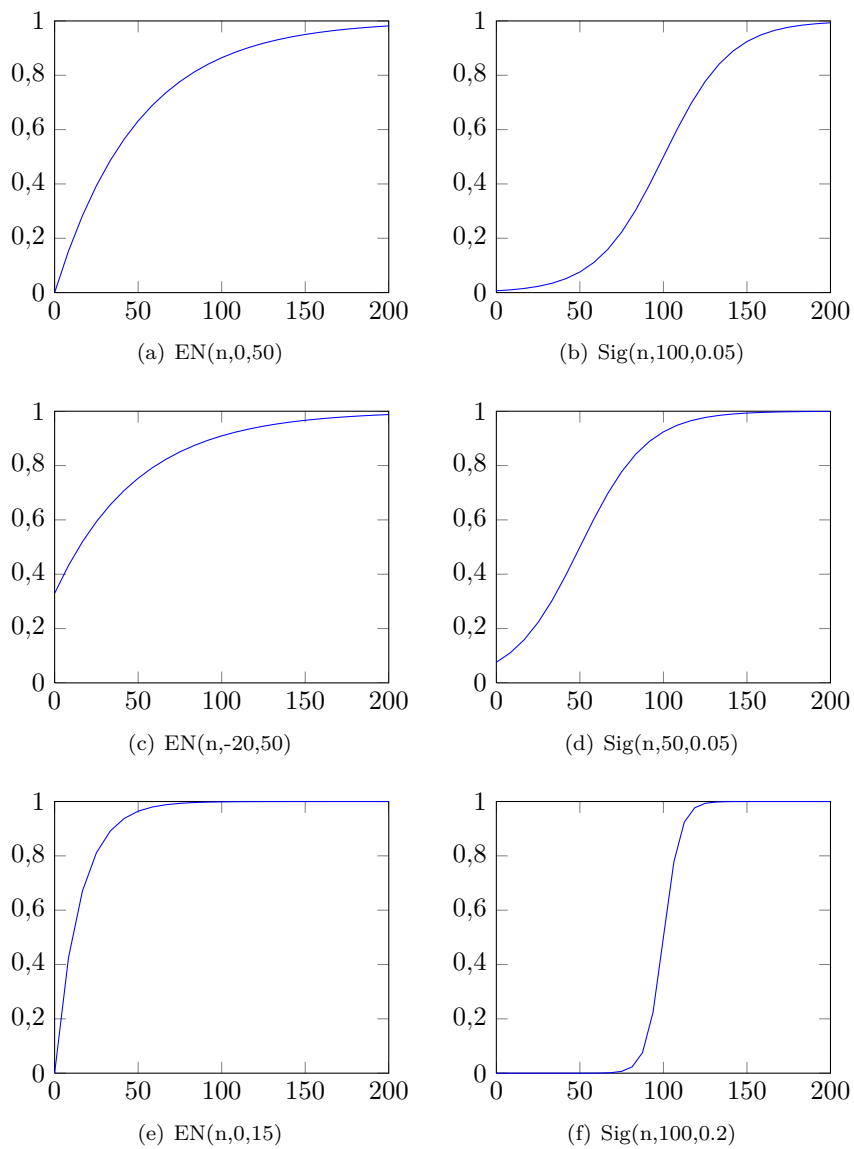


Figura 6.2: Funciones de evaluación de FP y FN

como el defecto periódico al que pertenecen. De este modo, si en una banda hubiese dos defectos periódicos distintos generados por el mismo cilindro de trabajo, no se consideraría un acierto el incluir a un defecto individual dentro de un defecto periódico distinto al que realmente pertenece, aunque ambos hayan sido generados por el mismo cilindro de trabajo. El tercer subtipo sería similar a la contabilización a nivel de banda. Las únicas clases en las que pueden ser clasificados los defectos individuales son *defecto de naturaleza periódica* (pertenece a algún defecto periódico) y *defecto de naturaleza no periódica* (no pertenece a ningún defecto periódico). En este caso, sólo se tiene en cuenta la pertenencia de un defecto individual a un defecto periódico, ignorando el cilindro de trabajo que lo haya generado (en caso de que sea de naturaleza periódica). Estos tres tipos de contabilización se basan en la caracterización de los defectos periódicos, ya que se tiene en cuenta como son los defectos periódicos y no sólo su presencia.

Para ejemplificar cada uno de estos subtipos, se utilizará el siguiente ejemplo:

- Se dispone de una banda de acero que tiene 1380 defectos individuales en su superficie. Éstos están repartidos en 4 defectos periódicos del siguiente modo:
 - Defecto periódico 1 (cilindro 6): Está formado por 200 defectos individuales.
 - Defecto periódico 2 (cilindro 6): Está formado por 50 defectos individuales.
 - Defecto periódico 3 (cilindro 5): Está formado por 50 defectos individuales.
 - Defecto periódico 4 (cilindro 4): Está formado por 80 defectos individuales.
 - El resto de los defectos individuales (1000) son de naturaleza no periódica.
- La herramienta utilizada cuya caracterización se evalúa, generó los siguientes resultados:
 - De los 200 defectos individuales del defecto periódico 1, 130 fueron incluidos dentro de él, 20 dentro del defecto periódico 2, 25 dentro del defecto periódico 3, 15 dentro del defecto periódico 4 y los otros 10 fueron clasificados como de naturaleza no periódica.
 - De los 50 defectos individuales del defecto periódico 2, 40 fueron incluidos dentro de él y los otros 10 fueron clasificados como de naturaleza no periódica.
 - De los 50 defectos individuales del defecto periódico 3, 40 fueron incluidos dentro de él y los otros 10 dentro del defecto periódico 1.

- De los 80 defectos individuales del defecto periódico 4, 25 fueron incluidos dentro de él, 15 dentro del defecto periódico 3 y los otros 40 fueron clasificados como de naturaleza no periódica.
- De los 1000 defectos de naturaleza no periódica, 30 fueron incluidos dentro del defecto periódico 2, 15 dentro del defecto periódico 3 y los otros 955 fueron clasificados correctamente como defectos de naturaleza no periódica.

6.2.3.1. Contabilización en cilindros

Mediante el primero de los subtipos de contabilización por defecto individual descritos, cada elemento puede clasificarse como perteneciente a uno de los 7 cilindros de trabajo, o también como que no pertenece a ninguno de ellos (el caso de defectos individuales de naturaleza no periódica). De este modo, la matriz de confusión obtenida para el ejemplo sería la mostrada en la tabla 6.5.

| | | Clasificado como: | | | | | | | |
|--------|-------------|-------------------|---|---|---|----|----|-----|-------------|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Inexistente |
| Clase: | 0 | | | | | | | | |
| | 1 | | | | | | | | |
| | 2 | | | | | | | | |
| | 3 | | | | | | | | |
| | 4 | | | | | 25 | 15 | | 40 |
| | 5 | | | | | | 40 | 10 | |
| | 6 | | | | | 15 | 25 | 190 | 20 |
| | Inexistente | | | | | | 15 | 30 | 955 |

Tabla 6.5: Matriz de confusión de contabilización por defecto individual (en cilindros)

Este modo de contabilizar los aciertos y los fallos guiaría el proceso de entrenamiento de una herramienta hacia la caracterización de los defectos periódicos de una forma precisa, valorando positivamente el asignar a cada defecto periódico el cilindro de trabajo que realmente lo generó, y el incluir en el defecto periódico el mayor número posible de defectos individuales que realmente le pertenecen, o dicho de otra forma, pesando negativamente el asociarles defectos individuales generados por otros cilindros de trabajo o de naturaleza no periódica.

Puesto que las métricas que se van a utilizar para valorar la calidad de las

detecciones y caracterizaciones trabajan con los valores correspondientes a TP, FN, FP y TN, es necesario establecer qué celdas de la matriz de confusión pertenece a cada una de estas situaciones, o dicho de otro modo, determinar qué defectos individuales pertenecen a cada una de dichas situaciones en función de cómo han sido detectados y cómo son realmente. Para cada defecto individual, se produce una de las situaciones siguientes:

- El defecto individual fue clasificado como generado por el cilindro que realmente lo generó. Este caso es un acierto, y el defecto es TP.
- El defecto individual fue generado de forma periódica, pero fue clasificado como de naturaleza no periódica. Este caso es un fallo, y el defecto es FN.
- El defecto individual no fue generado de forma periódica, pero se le clasificó como generado de forma periódica por alguno de los cilindros. Este caso es un fallo y el defecto es FP.
- El defecto individual fue generado de forma periódica, pero se le asignó un cilindro incorrecto. Este caso es un fallo, y el defecto es FN/FP.
- El defecto individual es de naturaleza no periódica y fue clasificado correctamente como de naturaleza no periódica. Este caso es un acierto, y el defecto es TN.

En la tabla 6.6 se muestra qué elementos de la matriz de confusión se corresponden con cada una de estas situaciones. El caso de un defecto de naturaleza periódica mal clasificado influye muy negativamente, al ser contabilizado al mismo tiempo como FN y FP. Es la misma situación que se producía con la contabilización por defecto periódico cuando éstos eran asignados al cilindro incorrecto. El contabilizar estos fallos de forma tan negativa tiene como objetivo evitar las situaciones de paro de producción para reparar un cilindro en buen estado y que al reanudarla el defecto periódico se siga produciendo.

6.2.3.2. Contabilización en defectos periódicos

El segundo subtipo de contabilización por defecto individual sigue utilizando los defectos individuales como elementos de estudio, igual que en el caso recién comentado. La diferencia es que para este subtipo, las clases a las que pueden ser asociados cada defecto individual son los defectos periódicos que realmente existen en la banda. De este modo se pretende que las detecciones realizadas por la herramienta sean más precisas, de tal modo que, además de poder clasificar correctamente a cada defecto individual con el cilindro que lo generó, distinga entre dos defectos individuales generados por el mismo cilindro, pero pertenecientes a defectos periódicos distintos (bien porque la posición transversal de los

| | | Clasificado como: | | | | | | | | |
|--------|-------------|-------------------|----|----|----|----|----|----|-------------|--|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Inexistente | |
| Clase: | 0 | TP | FN | | | | | | TN | |
| | 1 | | TP | FN | | | | TN | | |
| | 2 | | | TP | / | | | TN | | |
| | 3 | | FN | | TP | FP | | FN | | |
| | 4 | | | / | | TP | TN | | | |
| | 5 | | | FP | | | TP | TN | | |
| | 6 | | | | | | | TP | TN | |
| | Inexistente | | FP | | | | | | TN | |

Tabla 6.6: Situaciones de detección en la contabilización por defecto individual (en cilindros)

defectos sea diferente o tengan una morfología claramente distinta, entre otros posibles motivos). Según esta definición, la matriz de confusión generada para este caso sería la mostrada en la tabla 6.7.

| | | Clasificado como: | | | | |
|--------|---------|-------------------|--------|--------|--------|---------|
| | | D.P. 1 | D.P. 2 | D.P. 3 | D.P. 4 | Ninguno |
| Clase: | D.P. 1 | 130 | 20 | 25 | 15 | 10 |
| | D.P. 2 | | 40 | | | 10 |
| | D.P. 3 | 10 | | 40 | | |
| | D.P. 4 | | | 15 | 25 | 40 |
| | Ninguno | | 30 | 15 | | 955 |

Tabla 6.7: Matriz de confusión de contabilización por defecto individual (en defectos periódicos)

Una métrica que utilice este modo de contabilización, podría entrenar a una herramienta para que realice detecciones más precisas que con el modo de contabilización anterior, distinguiendo a los defectos individuales generados por un mismo cilindro de trabajo según al defecto periódico al que pertenezcan. Esta información adicional no resulta demasiado útil, ya que importa poco que existan uno o dos defectos periódicos generados por el mismo cilindro de trabajo:

en ambos casos debe deneterse la producción y reparar dicho cilindro. Además, el plantear este método de contabilización conlleva un problema importante, y es el de conocer las clases en las que clasificar a los defectos individuales. En este caso, es necesario conocer cuantos defectos periódicos existen realmente en la banda y el cilindro de trabajo responsable de cada uno de ellos, dato que varía entre banda y banda. Además, podría ser que un conjunto de defectos individuales fueran agrupados como parte de un mismo defecto periódico que no existe en la realidad, con lo cual no podría asignarse a ninguna de las clases elaboradas a priori. Otro inconveniente importante es la asociación de cada elemento a una de las cuatro situaciones con las que deberán trabajar las métricas: TP, FN, FP y TN. En el caso de los aciertos (TP y TN) esto no supone ningún problema, ni tampoco el caso en el que un defecto individual que pertenece a un defecto periódico sea clasificado como de naturaleza no periódica (FN) o el caso en el que un defecto individual de naturaleza no periódica sea clasificado como parte de un defecto periódico (FP). La situación problemática sería cuando un defecto individual pertenece a un defecto periódico pero se le ha asignado otro. Una situación parecida ocurriría con las contabilizaciones por defecto periódico y por defecto individual en cilindros. En esos casos, estos elementos eran simultáneamente clasificados como FN y FP, ya que pueden provocar la detención de la producción para reparar el cilindro incorrecto. En este caso esto no se puede asegurar, ya que un elemento puede ser clasificado como de un defecto periódico incorrecto pero que el cilindro que lo ha generado sí sea el correcto. Para no tener que trabajar con estos problemas, no es recomendable utilizar la contabilización de aciertos de este subtipo, siendo siempre mejor utilizar otra para las cuales las clases en las que pueden ser clasificados los elementos de estudio estén perfectamente definidas desde el principio, y que éstas no varíen.

6.2.3.3. Contabilización en naturaleza periódica/no periódica

El tercer subtipo de contabilización por defecto individual es mucho más simple que los dos primeros, ya que trabaja, al igual que la contabilización por banda, únicamente con dos clases. Éstas son que un defecto individual pertenezca a un defecto periódico (sin importar cual sea éste ni cual sea el cilindro que lo generó) o que no pertenezca a ninguno, es decir, que sean de naturaleza periódica o de naturaleza no periódica. En este caso, la matriz de confusión generada para el ejemplo sería la mostrada en la tabla 6.8.

Contabilizando aciertos y fallos de este modo, al igual que el primer subtipo por defecto individual, se tiene como ventaja respecto al segundo que las clases en las que se puede clasificar cada defecto individual están definidas de antemano y no varían entre banda y banda. En el caso del primer subtipo de contabilización por defecto individual, donde se clasificaba cada defecto individual según el cilindro que lo generó (en caso de ser de naturaleza periódica), se

| | | Clasificado como: | |
|--------|---------------------|-------------------|---------------------|
| | | Pertenece a D.P. | No pertenece a D.P. |
| Clase: | Pertenece a D.P. | 380 | 320 |
| | No pertenece a D.P. | 45 | 955 |

Tabla 6.8: Matriz de confusión de contabilización por defecto individual (según naturaleza)

valoraba más positivamente aquellos casos en los que los defectos individuales habían sido asignados al cilindro de trabajo que realmente los generó. En este último subtipo este dato se ignora, importando únicamente que se haya clasificado correctamente cada defecto individual como de naturaleza periódica o no periódica. Este modo de evaluar las caracterizaciones de los defectos periódicos guiará el entrenamiento de las herramientas de tal modo que consigan encontrar el mayor número de defectos de naturaleza periódica, sin importar el cilindro de trabajo que los haya generado. Desde el punto de vista del trabajador de la planta de laminación, es interesante conocer es si existen defectos generados de forma periódica o no. En caso de que los haya (bien sean sólo de un cilindro o de varios) habrá que detener la producción para sustituir el cilindro o cilindros que estén dañados. Si la alarma generada que advierte de la presencia de defectos de naturaleza periódica va acompañada de información adicional, como por ejemplo el número de defectos individuales de naturaleza periódica detectados, cuanto mayor sea este número más grave se considerará el problema del que se da aviso. El principal problema de este modo de contabilización, al igual que ocurría con la contabilización por banda, es que se desconoce el cilindro que ha generado los defectos periódicos, siendo necesaria la inspección de todos ellos para determinar cual (o cuales) está fallando.

Mediante este subtipo de contabilización, la matriz de confusión utilizada y mostrada en la tabla 6.8 es de dimensión 2×2 . Esto significa que cada defecto individual, según su naturaleza y como haya sido clasificado, se encontrará en una de esas cuatro componentes de la matriz, que se corresponden con cada una de las cuatro siguientes situaciones:

- El defecto individual pertenece a un defecto periódico y fue clasificado como perteneciente a un defecto periódico: Este caso se considera un acierto y el defecto es TP.
- El defecto individual pertenece a un defecto periódico y no fue clasificado como perteneciente a un defecto periódico: Este caso se considera un fallo y el defecto es FN.

- El defecto individual no pertenece a ningún defecto periódico y fue clasificado como perteneciente a un defecto periódico: Este caso se considera un fallo y el defecto es FP.
- El defecto individual no pertenece a ningún defecto periódico y no fue clasificado como perteneciente a ningún defecto periódico: Este caso se considera un acierto y el defecto es TN.

Utilizando esta nomenclatura, la matriz de confusión genérica sería la mostrada en la tabla 6.9, donde, como en el resto de los casos, los componentes de la diagonal principal son los que representan los casos de éxito:

| | | Clasificado como: | |
|--------|---------------------|-------------------|---------------------|
| | | Pertenece a D.P. | No pertenece a D.P. |
| Clase: | Pertenece a D.P. | TP | FN |
| | No pertenece a D.P. | FP | TN |

Tabla 6.9: Situaciones de detección en la contabilización por defecto individual (según naturaleza)

6.2.4. Resumen de características de los métodos de contabilización

Los métodos de contabilización propuestos en esta sección tienen distintas características, por lo que si se utilizaran para entrenar una herramienta de detección de defectos periódicos, las soluciones que generase ésta serían distintas. Dependiendo del tipo de contabilización utilizado, la herramienta proporcionaría distinta información para ser tenida en cuenta por los operadores de la planta de producción para decidir si detener la laminación o no y qué cilindro debe ser sustituido. En la tabla 6.10 se muestran todos los métodos de contabilización presentados y las características de cada uno de ellos. Concretamente: el número de clases que utiliza para clasificar los elementos (Indeterminado en el caso de contabilización por defecto individual en defecto periódico), si se basa simplemente en la detección de los defectos periódicos o en sus características y la información que proporcionaría la herramienta al usar cada uno de estos métodos. Sólomente tres de ellos conseguirían proporcionar todos los aspectos de la detección que pudieran ser relevantes a los operadores de la planta: contabilización por defecto periódico (híbrido y real) y contabilización por defecto individual en defectos periódicos. Ya se comentaron las dificultades de la aplicación de este último, con lo cual se descarta su aplicación. Los otros dos métodos

de contabilización son muy similares, pero la contabilización real tiene en cuenta de un modo más adecuado los casos de fallo en la detección. Por estos motivos, el método de contabilización real por defectos periódicos es el más adecuado para utilizar en las fases de entrenamiento y *test* de la herramienta, aunque se utilizarán también algunos de los otros para comparar sus resultados.

| | Nº Clases | Tipo Detección Caracterización | Información Banda defectuosa Cilindro defectuoso Nivel daño cilindro Nº def. periódicos Gravedad defectos |
|---|-----------|--------------------------------------|--|
| Por banda | 2 | ■ □ | ■ □ □ □ □ |
| Por defecto periódico (binario) | 8 | ■ □ | ■ ■ □ ■ □ |
| Por defecto periódico (híbrido) | 8 | ■ ■ | ■ ■ ■ ■ ■ ■ |
| Por defecto periódico (real) | 8 | ■ ■ | ■ ■ ■ ■ ■ ■ |
| Por defecto individual (cilindro) | 8 | ■ ■ | ■ ■ ■ ■ □ □ |
| Por defecto individual (def. periódico) | Indet. | ■ ■ | ■ ■ ■ ■ ■ ■ |
| Por defecto individual (naturaleza) | 2 | ■ ■ | ■ □ ■ □ □ □ |

Tabla 6.10: Características de los métodos de contabilización

6.3. Métricas

Los tipos de contabilización de aciertos y fallos descritos en la sección 6.2, se encargan de clasificar elementos en clases, y según como se hubiera realizado esta clasificación, cada elemento puede pertenecer a alguna de las situaciones definidas como TP, FN, FP y TP. En esta sección se listan una serie de métricas que pueden ser utilizadas para combinar estos cuatro valores para obtener un número real comprendido en el intervalo $[0 - 1]$ que sirva como una valoración de la calidad de una detección de defectos periódicos.

6.3.1. Errores de tipo I y II

En [Yasnoff *et al.*, 1977] se propusieron unas métricas para evaluar métodos de segmentación de imágenes, en las cuales cada píxel podía ser clasificado entre k clases diferentes. Estas métricas miden, de maneras distintas, el error cometido. A continuación se enuncia cada una de ellas en el caso de contar con k clases y su

particularización para los tipos de contabilización donde se cuenta únicamente con 2 clases (contabilización banda y por defecto individual según naturaleza). El error de tipo I puede definirse como el tanto por uno de los elementos que realmente pertenecen a la clase k y que han sido clasificados incorrectamente (como de una clase distinta a k).

$$E_I^k = \frac{\left(\sum_{i=1}^N C_{ki} \right) - C_{kk}}{\sum_{i=1}^N C_{ki}} \quad (6.4)$$

Donde N es el número total de clases diferentes y C_{ij} es el contenido de la posición i, j de la matriz de confusión. En el caso particular de la caracterización de defectos periódicos y para las contabilizaciones descritas con sólo dos clases distintas, esta expresión queda reducida a las dos siguientes:

$$E_I^{Per} = \frac{FN}{FN + TP} \quad (6.5)$$

$$E_I^{NoPer} = \frac{FP}{FP + TN} \quad (6.6)$$

Las ecuaciones 6.5 y 6.6 representan el error de tipo I para las clases *Defecto de naturaleza periódica* o *Banda con defectos periódicos* y *Defecto de naturaleza no periódica* o *Banda sin defectos periódicos* respectivamente.

El error de tipo II se puede definir como el tanto por uno de los elementos que fueron clasificados como de la clase k pero que realmente pertenecen a otra clase distinta a k .

$$E_{II}^k = \frac{\left(\sum_{i=1}^N C_{ik} \right) - C_{kk}}{\left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{ij} \right) - \sum_{i=1}^N C_{ki}} \quad (6.7)$$

Donde, igual que en el caso anterior, N representa el número total de clases diferentes y C_{ij} es el contenido de la posición i, j de la matriz de confusión. Las expresiones que resultan en este caso particular para el error de tipo II utilizando contabilizaciones con dos clases son las siguientes:

$$E_{II}^{Per} = \frac{FP}{FP + TN} \quad (6.8)$$

$$E_{II}^{NoPer} = \frac{FN}{FN + TP} \quad (6.9)$$

En el caso de los tipos de contabilización que cuentan sólo con dos clases diferentes, ocurre que los elementos que no pertenecen a una clase pertenecen forzosamente a la otra, y que un elemento que no haya sido clasificado como de una clase, tiene que haber sido clasificado como de la otra. Por este motivo se obtienen las ecuaciones descritas anteriormente, donde el Error de tipo I de una clase coincide con el error de tipo II de la otra.

6.3.2. Probabilidad de error

En [Lee *et al.*, 1990] también se propone un método para evaluar la segmentación de imágenes, sólo que en éste, se cuenta únicamente con 2 clases diferentes para clasificar cada píxel: píxel de un objeto (o de un borde) y píxel de fondo. En ese caso, se toma como acierto el conseguir clasificar como píxel de objeto todos aquellos píxeles que realmente pertenecen a un objeto (los cuales forman el conjunto de *true positives* sin tener mucho en cuenta el hecho de clasificar correctamente los píxeles que forman parte del fondo (la gran mayoría). Esta métrica al utilizar solamente dos clases, sólo es aplicable para los tipos de contabilización que cuentan con dos clases. En esos casos, se toma como acierto clasificar como defecto individual de naturaleza periódica a todos aquellos que realmente lo sean (o clasificar como banda con defecto periódico a aquellas que realmente los tienen) sin otorgar mucha importancia al otro tipo de acierto: clasificar correctamente los defectos individuales de naturaleza no periódica o las bandas sin defectos periódicos. Este método de evaluación, basado en la teoría de la probabilidad, puede enunciarse como la probabilidad de que un elemento elegido aleatoriamente, haya sido clasificado incorrectamente.

Expresado en términos probabilísticos, la probabilidad de cometer un error a la hora de clasificar un elemento es la suma de las probabilidades de clasificarlo incorrectamente. Esto es:

- Contabilización por banda: La suma de la probabilidad de clasificar una banda como que no tiene defectos periódicos cuando realmente sí los tiene y de la probabilidad de clasificar una banda como que sí tiene defectos periódicos cuando realmente no los tiene.
- Contabilización por defecto individual (según su naturaleza): La suma de la probabilidad de clasificar a un defecto individual como de naturaleza periódica cuando es de naturaleza no periódica y de la probabilidad de clasificarlo como de naturaleza no periódica cuando es de naturaleza periódica.

El cálculo de esta probabilidad se indica en la ecuación 6.10.

$$PE = P(NoPer)P(Per/NoPer) + P(Per)P(NoPer/Per) \quad (6.10)$$

Cada uno de los factores de ambos sumandos se desarrollan como sigue.

$$P(NoPer) = \frac{TN + FP}{TP + TN + FP + FN} \quad (6.11)$$

En la ecuación 6.11 se calcula la probabilidad de que un elemento elegido al azar sea de naturaleza no periódica. Este cálculo se realiza simplemente aplicando la *Regla de Laplace* para el cálculo de probabilidades: el cociente entre el número de casos favorables entre el número de casos posibles.

Por otra parte, la probabilidad de que un elemento elegido al azar haya sido clasificado como de naturaleza periódica pese a que éste sea de naturaleza no periódica se calcula en la ecuación 6.12.

$$P(Per/NoPer) = \frac{FP}{TN + FP} \quad (6.12)$$

Los dos factores del segundo sumando se calculan de manera análoga. En las ecuaciones 6.13 y 6.14 se calcula, respectivamente, la probabilidad de que un elemento elegido de manera aleatoria sea de naturaleza periódica y la probabilidad de que un elemento elegido de manera aleatoria se haya clasificado como de naturaleza no periódica pese a ser de naturaleza periódica.

$$P(Per) = \frac{TP + FN}{TP + TN + FP + FN} \quad (6.13)$$

$$P(NoPer/Per) = \frac{FN}{TP + FN} \quad (6.14)$$

Sustituyendo las expresiones calculadas en las ecuaciones 6.11, 6.12, 6.13 y 6.14 por sus correspondientes términos en la ecuación 6.10 se obtiene la expresión del cálculo del error de la siguiente manera:

$$PE = \frac{TN + FP}{TP + TN + FP + FN} \frac{FP}{TN + FP} + \frac{TP + FN}{TP + TN + FP + FN} \frac{FN}{TP + FN} \quad (6.15)$$

Sacando factor común se puede simplificar, resultando la ecuación 6.16.

$$PE = \frac{1}{TP + TN + FP + FN} \left(\frac{(TN + FP) FP}{TN + FP} + \frac{(TP + FN) FN}{TP + FN} \right) \quad (6.16)$$

Simplificando, el resultado final de la probabilidad de error queda como se indica en la ecuación 6.17.

$$PE = \frac{FP + FN}{TP + TN + FP + FN} \quad (6.17)$$

Este resultado puede generalizarse, y la ecuación 6.17 puede utilizarse para su aplicación en tipos de contabilización de aciertos y fallos que tengan más de dos clases, ya que la probabilidad de error se calcula como el número de casos en los que se ha realizado una clasificación incorrecta, FN+FP, dividido entre el número total de elementos, TP+FN+FP+TN (puesto que cada elemento tiene que estar forzosamente en una de estas cuatro situaciones).

6.3.3. Recall, Specificity, Accuracy y Precision

Es escasa la literatura científica publicada respecto al problema de la detección y caracterización de defectos periódicos, en particular las métricas aplicables a este problema. De todos modos, pueden aplicarse a este caso otras métricas ampliamente utilizadas para otros tipos de problemas de clasificación. En [Olson y Delen, 2008] se describen algunas de las más utilizadas.

Independientemente del tipo de contabilización que se utilice, cada elemento puede estar en una de las cuatro situaciones comentadas anteriormente: TP, FN, FP y TN (esta última no existe en algunos casos). De estas, los casos de éxito son TP y TN, siendo los casos de fracaso los otros dos: FN y FP. Además, la finalidad de las herramientas de caracterización, es detectar la presencia de elementos de naturaleza periódica. En el caso la contabilización por banda, éstos elementos son las bandas con defectos periódicos. En el caso de la contabilización por defecto periódico, lo que se quiere detectar son los defectos periódicos, y en el caso de la contabilización por defecto individual, todos los defectos individuales pertenecientes a un defecto periódico, generados por un determinado cilindro o simplemente los de naturaleza periódica. De este modo, los elementos de naturaleza periódica son aquellos que pertenecen a TP (clasificados correctamente) o a FN (clasificados incorrectamente). Análogamente, los elementos de naturaleza no periódica son aquellos que pertenecen a FP (clasificados incorrectamente) o a TN (clasificados correctamente).

En este ámbito, la métrica *Recall* o también llamada *True Positive Rate* mide el tanto por uno de los elementos de naturaleza periódica que han sido detectados correctamente. Esta métrica se define con la siguiente expresión:

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (6.18)$$

En la ecuación 6.18 el numerador representa el número de elementos de naturaleza periódica clasificados correctamente, y el denominador, $TP + FN$ se

corresponde con el número de elementos que son realmente de naturaleza periódica. A esta misma expresión se puede llegar a través de la fórmula obtenida a partir del Error Tipo I para la clase *elemento de naturaleza periódica* definida en la ecuación 6.5. Hay que tener en cuenta, que tanto el Error de Tipo I, como el Error de Tipo II y la probabilidad de error descritas en los apartados 6.3.1 y 6.3.2 respectivamente no se pueden considerar métricas, tal y como se definieron en el apartado 6.1, donde éstas se definían como una medida de la bondad de una detección/caracterización, donde el valor asignado a la caracterización óptima es 1 y el valor asignado a una caracterización totalmente incorrecta es 0. El concepto de error es contrario a esta definición, es decir, tener un error 0 significa haber realizado una caracterización perfecta, y tener un error 1 significa todo lo contrario. Si restamos a 1 los errores descritos en los apartados anteriores, entonces sí obtendríamos un valor de métrica. Concretamente, restando el valor del Error de Tipo I de la clase *elemento de naturaleza periódica* (o también el Error de Tipo II de la clase *elemento de naturaleza no periódica*) se obtiene lo siguiente:

$$1 - E_I^{Per} = \frac{FN + TP}{FN + TP} - \frac{FN}{FN + TP} = \frac{TP}{FN + TP} = Recall \quad (6.19)$$

La métrica *Specificity* o también llamada *True Negative Rate* es similar a la anterior, solo que ésta se centra en los elementos de naturaleza no periódica. Dicho de otro modo, esta métrica mide el tanto por uno de los elementos de naturaleza no periódica que han sido clasificados correctamente.

$$Specificity = \frac{TN}{TN + FP} \quad (6.20)$$

En la ecuación 6.20 el numerador representa el número de elementos de naturaleza no periódica clasificados correctamente, y el denominador, $TN + FP$ se corresponde con el número de defectos individuales que son realmente de naturaleza no periódica. Esta métrica no es aplicable en el caso de utilizar contabilización por defecto periódico, donde no había elementos TN. En el resto de casos, contabilización por banda y por defecto individual, puede ser aplicado, aunque no es aconsejable en el último caso. Puesto que la gran mayoría (en algunos casos todos) de los defectos individuales presentes en una banda son de naturaleza no periódica, tener éxito a la hora de clasificar correctamente uno de estos defectos individuales no debería pesar mucho a la hora de calcular la métrica. Si una herramienta de caracterización determinase siempre que no existe ningún defecto de naturaleza periódica, estaría acertando en la mayoría de los casos y el valor proporcionado por la métrica sería elevado, cuando en realidad no está generando un resultado válido. Por este motivo, para este problema concreto, las métricas que valoren el hecho de haber clasificado correctamente los

elementos de naturaleza no periódica sólo pueden aplicarse en el caso de trabajar contabilizando aciertos y fallos por banda. Esta métrica puede obtenerse a partir del Error de Tipo I de la clase *elemento de naturaleza no periódica* de un modo similar a como se hizo con la métrica *Recall*.

$$1 - E_I^{NoPer} = \frac{TN + FP}{TN + FP} - \frac{FP}{TN + FP} = \frac{TN}{TN + FP} = Specificity \quad (6.21)$$

La métrica *Accuracy* mide cuantos elementos han sido clasificados correctamente.

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (6.22)$$

En la ecuación 6.22, el numerador representa el número de elementos que han sido clasificados correctamente (siendo *TP* los de naturaleza periódica y *TN* los de naturaleza no periódica) y el denominador representa el número total de elementos, obtenido al sumar el número de elementos de cada una de las cuatro situaciones posibles. Esta métrica se obtiene a partir de la expresión obtenida para la Probabilidad de Error descrita en la ecuación 6.17, en el apartado 6.3.2, como se demuestra en la ecuación 6.23.

$$\begin{aligned} 1 - PE &= \frac{TP + TN + FP + FN}{TP + TN + FP + FN} - \frac{FP + FN}{TP + TN + FP + FN} = \\ &= \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} = Accuracy \end{aligned} \quad (6.23)$$

Por último, la métrica *Precision*, en el ámbito de la caracterización de defectos periódicos, se define como el tanto por uno de los elementos que han sido clasificados como de naturaleza periódica y lo son realmente.

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (6.24)$$

En la ecuación 6.24, el numerador representa el número de elementos de naturaleza periódica que han sido clasificados correctamente, mientras que el denominador, *TP + FP*, el número de elementos que han sido clasificados como de naturaleza periódica por la herramienta (siendo *TP* el número de ellos que lo son realmente y *FP* el número de ellos que no lo son).

6.3.4. Métrica de Jaccard

La métrica de Jaccard, o *Jaccard Index* es una métrica creada por Paul Jaccard y publicada por vez primera en 1901 en [Jaccard, 1901]. Dicha métrica es aplicable a la caracterización de defectos periódicos, y en este ámbito se define como el tanto por uno de los elementos que fueron clasificados correctamente respecto al total de elementos, excluyendo los *True Negative* (cuando existan).

$$Jaccard = \frac{TP}{TP + FP + FN} \quad (6.25)$$

Como ya se comentó anteriormente, los elementos *True Negative* deben tener poco o ningún peso a la hora de calcular la métrica (salvo con contabilizaciones por banda). Esta métrica sólo devolverá un valor de 1 cuando en la caracterización evaluada no haya ningún elemento *False Positive* ni *False Negative*.

6.3.5. F-Métrica

La F-Métrica, también denominada *F-Score* o *F-Measure* (en lo sucesivo se utilizará este último nombre al ser el más usado para referirse a esta métrica en la literatura científica) combina los valores de las métricas *Precision* y *Recall* enunciadas en el apartado 6.3.3. Como ya se comentó, la métrica *Precision* mide el tanto por uno de los elementos clasificados como de naturaleza periódica que realmente lo son, mientras que la métrica *Recall* mide el tanto por uno de los elementos de naturaleza periódica que existen en la banda y han sido clasificados correctamente. Utilizando únicamente la métrica *Precision*, sólo se tendría en cuenta que los elementos de naturaleza periódica detectados lo sean, aunque supongan un tanto por uno muy pequeño del total. Como un objetivo muy importante en este problema es detectar el mayor número posible de elementos de naturaleza periódica, utilizar sólo esta métrica podría ofrecer pobres resultados. Por el contrario, utilizando únicamente la métrica *Recall* sólo se tendría en cuenta el conseguir detectar cuantos más elementos de naturaleza periódica mejor, sin importar que con ellos se hayan incluido una gran cantidad de falsos positivos. Para evitar llegar a ninguno de estos dos extremos, y tratar de detectar el mayor número de elementos de naturaleza periódica generando pocos falsos positivos, es una buena práctica utilizar una combinación de las métricas *Precision* y *Recall*, como hace *F-Measure*. La expresión matemática de *F-Measure* es la siguiente:

$$FMeasure(\alpha) = \frac{(1 + \alpha) Pr Re}{\alpha Pr + Re} \quad (6.26)$$

En la ecuación 6.26 los términos *Pr* y *Re* se refieren a los valores de las métricas *Precision* y *Recall* respectivamente tal y como se han definido en la sección 6.3.3

mediante las ecuaciones 6.24 y 6.18. El parámetro α que recibe la métrica sirve para ponderar su valor, pudiéndose dar más peso al valor de la métrica *Precision* o al de la métrica *Recall*. En el caso de que el parámetro α sea cero, el valor de *F-Measure* sería igual al de la métrica *Precision*, ignorando el valor de la métrica *Recall*, como se indica en la ecuación 6.27.

$$FMeasure(0) = \frac{PrRe}{Re} = Pr \quad (6.27)$$

A medida que el parámetro α tiende a infinito, el valor de *F-Measure* tiende a valor de la métrica *Recall*, como indica la ecuación 6.28.

$$\lim_{\alpha \rightarrow \infty} FMeasure(\alpha) = \lim_{\alpha \rightarrow \infty} \frac{(1 + \alpha)PrRe}{\alpha Pr + Re} = \lim_{\alpha \rightarrow \infty} \frac{PrRe + \alpha PrRe}{\alpha Pr + Re} \quad (6.28)$$

Aplicando la regla de *L'Hopital* queda la expresión 6.29.

$$\lim_{\alpha \rightarrow \infty} FMeasure(\alpha) = \frac{PrRe}{Pr} = Re \quad (6.29)$$

Resumiendo, el parámetro α debe ser un número real no negativo que servirá para ponderar el peso otorgado a las métricas de *Precision* y *Recall*. En el caso de querer dar el mismo peso a ambas, el valor de α debe ser igual a 1. En este caso el valor de la métrica será el siguiente:

$$FMeasure(1) = \frac{2PrRe}{Pr + Re} = \frac{2Re}{1 + \frac{Re}{Pr}} = \frac{2}{\frac{1}{Re} + \frac{1}{Pr}} \quad (6.30)$$

La expresión final de la igualdad 6.30 se corresponde con la media armónica de las métricas *Precision* y *Recall*. El hecho de que en el caso de querer otorgar el mismo peso a las métricas *Precision* y *Recall* se utilice la media armónica en lugar de la aritmética es para que la métrica combinada de ambas tienda a valores cercanos a cero cuando una de las dos presente un valor cercano a cero. Si se realizase la caracterización de defectos periódicos mediante una herramienta defectuosa que clasificara siempre todos los elementos como de naturaleza periódica (caracterización que se merece un valor de métrica muy bajo o nulo) mediante una media aritmética de sus valores de *Precision* y *Recall* obtendría siempre valores superiores a 0,5, ya que como consiguió localizar todos los defectos individuales de naturaleza periódica (al mismo tiempo que genera gran cantidad de falsos positivos), la métrica *Recall* tomaría un valor 1.

6.4. Métricas seleccionadas

De entre todos los tipos de contabilización de aciertos y fallos enunciados en la sección 6.2, la que más favorece al hecho de realizar una caracterización lo más parecida a la realidad es la contabilización por defecto periódico. Las contabilizaciones por banda y por defecto individual pueden ser adecuadas cuando lo único importante es saber si hay que detener la producción o no. La ventaja de trabajar contabilizando aciertos y fallos por defecto periódico es que, además de esto, se puede dar un aviso fiable de qué cilindro de trabajo es el que está generando los defectos periódicos (lo que resulta ser una información muy valiosa) y la gravedad de éstos (en función del número de defectos individuales que constituyen cada defecto periódico). De entre los tres tipos de contabilización por defecto periódico enunciados en el apartado 6.2.2, el mejor es el que realiza la contabilización con términos reales, ya que es capaz de medir con mayor exactitud la similitud de una detección realizada por la herramienta de caracterización con la realidad (definida por el *ground truth*). En este caso, se establece el modo en que se contabilizan los elementos TP, FN y FP (en las métricas a nivel de defecto periódico no hay elementos TN). En el caso de los defectos periódicos clasificados como TP, éstos deben ser contabilizados del tal modo que se les asigne un valor comprendido en el intervalo $[0 - 1]$ según su parecido con la realidad, es decir, combinando adecuadamente los valores ITP, IFP, IFN y ITN. Esta combinación se realizará aplicando la métrica de *Jaccard* a ITP, IFP e IFN, sin tener en cuenta el valor de ITN al ser éste poco relevante. En el caso de los defectos periódicos clasificados como FN y FP, se valorarán utilizando una función sigmoide. Esta función tiene multitud de aplicaciones en muchos campos, incluida la informática, donde su aplicación más conocida es en funciones de activación de redes neuronales artificiales [[Hasheminejad et al., 1994](#)]. Asignando unos valores adecuados a los parámetros *centro* y *rapidez* de las funciones exponencial negativa y sigmoide, se puede conseguir que sean muy similares en la mayoría del dominio. La única diferencia significativa entre ambas funciones es que la sigmoide puede configurarse para tener un crecimiento muy suave para valores pequeños de su dominio, mientras que la exponencial negativa siempre crece muy rápidamente para valores pequeños del dominio. Por este motivo la función elegida para realizar la valoración de los defectos periódicos FP y FN es la función sigmoide, ya que permite más flexibilidad a la hora de ser configurada. Puede configurarse para tener su característica forma de “S” o para tener una forma similar a la exponencial negativa, con un crecimiento fuerte para valores bajos del dominio, lo que la hace más versátil.

Para configurar adecuadamente la función sigmoide que se utilizará para valorar a los defectos periódicos FN y FP, es necesario disponer de un conjunto representativo de bandas de acero laminadas y que presenten defectos periódicos. Para ellas, se debe decidir qué defectos son poco importantes (con lo que

deberían recibir una penalización baja) y qué defectos son importantes y podrían hacer que el metal laminado no sea apto para su venta (con lo que deberían recibir una penalización alta). Para este conjunto de bandas, se han calculado los percentiles 20 y 95 del número de defectos individuales que tienen los defectos periódicos, correspondiéndose el percentil 20 con 20 defectos individuales y el percentil 95 con 276. La función sigmoide que se utilizará, se va a configurar para devolver un valor de 0,5 a los defectos periódicos con un número de defectos individuales igual al percentil 20, y un valor de 0,99 a los defectos periódicos con un número de defectos individuales igual al percentil 95. De este modo, la función utilizada (6.31) debe estar centrada en 20 y tener una rapidez de 0,075. La representación de esta función se muestra en la figura 6.3.

$$\text{Sig}(n) = \frac{1}{1 + e^{-0,075(n-20)}} \quad (6.31)$$

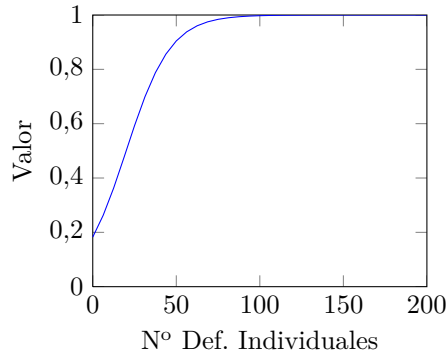


Figura 6.3: Función de valoración de defectos periódicos FN y FP

Aunque este modo de contabilizar los aciertos y los fallos sea, en principio, el más adecuado, se realizarán las fases de entrenamiento y *test* utilizando algún otro método de contabilización para poder comparar los resultados obtenidos entre ellos. Los métodos que se utilizarán son: los tres métodos de contabilización por defecto periódico (binarios, híbridos y reales), la contabilización por banda y la contabilización por defecto individual según la naturaleza de los elementos.

Una vez definidos los métodos que se van a utilizar para obtener los valores de TP, FN y FP, para obtener un valor de métrica en el intervalo $[0 - 1]$ para cada banda, es necesario combinar estos valores utilizando alguna de las métricas detalladas en el subapartado 6.3. Para poder comparar los distintos métodos de contabilización de aciertos y fallos, se utilizarán las mismas métricas para valorar las detecciones, por lo que al no disponer de elementos TN en algunos de ellos, no

se aplicarán las métricas *Specificity* y *Accuracy*. Por este motivo, se utilizarán las métricas de *Jaccard*, *Precision* y *Recall* (estas dos últimas de manera conjunta mediante *F-Measure*). Para *F-Measure*, en el campo de la caracterización de defectos periódicos, dar importancia al factor *Precision* significa dar importancia a evitar dar avisos de que se están produciendo defectos periódicos cuando no es cierto, lo que significaría detener la producción sin necesidad. En cambio, dar importancia al factor *Recall* significa asegurar que se generen avisos de que se están produciendo defectos periódicos cuando realmente es así, de tal modo que se minimicen los casos en los que no se generen este tipo de avisos cuando un cilindro de trabajo está defectuoso (lo que significa fabricar bandas no aptas para su venta). Puesto que ambos factores son importantes, el valor establecido para este parámetro es de 1, para dar igual importancia a ambos.

Capítulo 7

Diseño Experimental

Una vez que se dispone de una implementación del algoritmo presentado en el capítulo 5, es necesario establecer unos valores a sus parámetros de configuración antes de ponerlo en funcionamiento. El valor dado a cada parámetro influirá, en mayor o menor medida, en el comportamiento final de la herramienta de caracterización, por lo que deben ser establecidos de forma rigurosa. Puesto que no es posible determinar qué valores son los que mejor van a funcionar a priori, es necesario realizar un conjunto de experimentos para determinar su configuración óptima. Esta configuración será aquella para la cual el valor promedio de una métrica para un conjunto de bandas de entrenamiento es máximo. Por este motivo, la métrica utilizada es un factor clave, ya que guiará la fase de entrenamiento. Puesto que hay varios tipos de métodos de contabilización de aciertos y fallos que son aplicables a este problema, según lo comentado en el capítulo 6, se determinará la configuración óptima de parámetros para varios de ellos. Todo este proceso engloba los siguientes pasos:

- Seleccionar un conjunto de bandas representativas para formar el conjunto de bandas de entrenamiento y que se utilizarán para entrenar la herramienta.
- Diseñar y ejecutar los experimentos que se van a utilizar para encontrar la configuración que proporciona los mejores valores de métrica para el conjunto de bandas elegido. Esto se realizará para varias métricas distintas.
- Ejecutar la herramienta de caracterización para un conjunto de bandas de *test* utilizando la configuración óptima determinada para cada método de contabilización. El conjunto de bandas de entrenamiento y el conjunto de bandas de *test* deben ser conjuntos disjuntos.
- Analizar los resultados proporcionadas por la herramienta de caracterización para cada método de contabilización y decidir cuales son mejores desde el punto de vista industrial, es decir, cuales son de mayor utilidad para un operador a la hora de decidir si hay o no hay defectos periódicos en las bandas, si éstos son de suficiente gravedad como para detener la

producción y determinar claramente qué cilindro de trabajo es el que está generando dichos defectos. La configuración de la herramienta de caracterización determinada para el método de contabilización que proporcione los mejores resultados será considerada la configuración óptima.

7.1. Pruebas planteadas

Para configurar adecuadamente el algoritmo implementado y posteriormente comprobar su correcto funcionamiento, son necesarias sendas fases de experimentación. En la primera de ellas, se buscará la configuración de parámetros que mejores resultados proporcione, para varias de las métricas planteadas en el capítulo 5 usando un conjunto de bandas de entrenamiento. Cada una de las métricas otorgará a cada caracterización una puntuación en el intervalo $[0-1]$ en función del grado de similitud existente entre los defectos periódicos detectados y los que realmente existen en la banda. Para poder realizar esta comparación es imprescindible contar con la solución óptima o *ground truth* de cada una de estas bandas, es decir, se debe conocer el número de defectos periódicos que existen en cada banda y los defectos individuales que constituyen cada uno de ellos. Con esta información podrían evaluarse las caracterizaciones proporcionadas por la herramienta mediante cualquier método de contabilización y métrica de los expuestos en el capítulo 6. Mediante la herramienta de clasificación manual de defectos periódicos descrita en la sección 4.3 puede obtenerse esta información de un modo sencillo para cualquier banda. De este modo, pueden utilizarse bandas reales para la fase de entrenamiento en lugar de tener que recurrir a bandas sintéticas (para las cuales, obviamente, se contaría siempre con una caracterización perfecta de sus defectos periódicos, pero no serían representativas de la realidad). Para que el entrenamiento sea lo más general posible, deben utilizarse bandas con distintas características y que representen toda la diversidad de bandas que pueden laminarse en la planta de Arcelor-Mittal de Avilés. Concretamente, para la fase de entrenamiento se ha elegido un conjunto de 18 bandas cuyas características se muestran en la tabla 7.1. En ella, se muestra el material, la anchura y longitud de cada una de las bandas seleccionadas. Además, también se especifica el número de defectos periódicos que tiene, qué cilindros estaban defectuosos en el momento en que se laminó la banda, el número de defectos individuales que pertenecen a un defecto periódico (columna N° Defectos ind. en d.p.) y el número total de defectos individuales presentes en la banda (tanto los de naturaleza periódica como los de naturaleza no periódica). Además, los defectos periódicos existentes entre esas 18 bandas también son distintos entre sí, variando de unos a otros la morfología de los defectos individuales que los constituyen, el cilindro de trabajo que los generó y el número de defectos individuales que pertenecen a cada uno (hay defectos periódicos que tienen desde 10

hasta más de 400 defectos individuales). Tanto en este conjunto de bandas como en las bandas seleccionadas para realizar el *test* (se muestran más adelante), los únicos cilindros de trabajo que generan defectos periódicos son los dos últimos, los cilindros 5 y 6. Este hecho se debe a que los defectos periódicos generados por los primeros cilindros suelen ser atenuados al pasar por los cilindros siguientes, con lo que su forma final es lo suficientemente débil como para que no pueda ser detectada por el sistema de visión por computador. En ocasiones (aunque muy raras) pueden aparecer defectos generados por el cilindro 4, pero en los casos en los que persisten los defectos generados por los cilindros 0, 1, 2 y 3, éstos son tan severos que la banda es completamente inservible y debe ser desechada.

Para cada banda y método de contabilización, se realizará una búsqueda en el espacio formado por los 7 parámetros de configuración definidos para el algoritmo en la sección 5.3 (en realidad, en dicha sección se definieron 8 parámetros de configuración, pero el parámetro *SType* se dejará siempre fijo con un valor *falso*, para que se permita la agrupación de defectos individuales de distintos tipos en un mismo defecto periódico). En [Wu y Hamada, 2000] se recogen distintas formas de plantear procesos de optimización como el que se aborda en esta sección. El que finalmente se va a utilizar para determinar la configuración óptima de cada métrica es el *full-factorial* o factorial completo. Mediante este método, se comprueban todas las posibles combinaciones de valores de los parámetros, eligiendo finalmente la mejor de ellas. Puesto que si se comprobaran todos los posibles valores de cada parámetro se generaría un espacio infinito, cada uno de ellos debe ser acotado entre dos valores límite razonables. Además, puesto que algunos de ellos son de naturaleza continua, aunque estén acotados, siguen teniendo un número infinito de valores posibles. Por ello, este tipo de parámetros deben ser discretizados estableciendo un paso adecuado en cada caso, tal y como se muestra en la tabla 7.2. Con el fin de reducir el espacio de búsqueda, el paso fijado para alguno de los parámetros de naturaleza discreta es mayor que 1.

A los tres parámetros correspondientes a las características morfológicas de los defectos individuales (*ARatio*, *LenRatio* y *WidRatio*) se les ha asignado un paso muy grande por dos motivos: el primero es para evitar que el número de combinaciones generadas por los siete parámetros sea excesivo, y el segundo (y más importante) es que mediante simulaciones previas a la experimentación se ha determinado que estos parámetros provocan un comportamiento binario en las métricas, es decir, el valor devuelto por la métrica es muy cercano a 0 ó al valor máximo para cada banda.

Según los valores límite de los parámetros y el paso establecido para cada uno de ellos, se tienen casi 1 millón y medio de combinaciones distintas que han de ejecutarse para cada una de las 18 bandas, lo que resulta en cerca de 27 millones de ejecuciones. En un computador normal (del año 2010) cada ejecución tarda una media de 6 segundos (este valor depende en gran medida de la banda a analizar y los parámetros de configuración, pero se puede tomar este valor

Tabla 7.1: Bandas seleccionadas para el entrenamiento

| ID | Material | Anchura (milímetros) | Longitud (metros) | Nº Defectos periódicos | Cilindros defectuosos | Nº Defectos ind. en d.p. | Nº Defectos individuales |
|------|-----------|-------------------------|----------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| E-1 | Low-Soft | 1382 | 1124 | 3 | 6 | 527 | 1228 |
| E-2 | Low-Soft | 1332 | 690 | 4 | 5 y 6 | 405 | 1779 |
| E-3 | High-Soft | 1305 | 603 | 2 | 6 | 395 | 1152 |
| E-4 | High-Soft | 1240 | 663 | 2 | 6 | 191 | 1247 |
| E-5 | High-Soft | 1242 | 698 | 3 | 6 | 150 | 1198 |
| E-6 | Low-Soft | 1238 | 944 | 1 | 6 | 86 | 489 |
| E-7 | Low-Hard | 1266 | 845 | 3 | 6 | 111 | 1270 |
| E-8 | High-Soft | 1230 | 679 | 1 | 6 | 298 | 123 |
| E-9 | Low-Soft | 1210 | 912 | 1 | 6 | 249 | 1757 |
| E-10 | Low-Soft | 1210 | 914 | 1 | 6 | 226 | 2124 |
| E-11 | Low-Soft | 1210 | 915 | 1 | 6 | 82 | 1924 |
| E-12 | Low-Soft | 1199 | 645 | 1 | 6 | 50 | 644 |
| E-13 | High-Soft | 1155 | 771 | 1 | 6 | 41 | 1177 |
| E-14 | High-Soft | 1155 | 785 | 1 | 6 | 21 | 1965 |
| E-15 | Low-Soft | 1120 | 720 | 1 | 6 | 107 | 4268 |
| E-16 | Low-Soft | 1120 | 719 | 1 | 6 | 152 | 2994 |
| E-17 | Low-Soft | 1120 | 720 | 1 | 6 | 213 | 3713 |
| E-18 | Low-Soft | 1120 | 722 | 1 | 6 | 223 | 4397 |

Tabla 7.2: Valores límite de los parámetros en la experimentación

| Parámetro | Valor mínimo | Valor máximo | Paso |
|-----------|--------------|--------------|------|
| MinDefs | 5 | 20 | 1 |
| MaxSkips | 6 | 40 | 2 |
| ARatio | 1 | 101 | 100 |
| WidRatio | 1 | 101 | 100 |
| LenRatio | 1 | 101 | 100 |
| TTol | 40 | 130 | 4 |
| YRatio | 1 | 40 | 2 |

como promedio). Esto supone más de 5 años de computación necesaria para poder realizar la exploración completa, lo cual es inviable. Para reducir el tiempo necesario de computación se decidió recurrir a tecnologías *grid* [Foster *et al.*, 2001]. Utilizando un *grid* de 60 computadores trabajando en paralelo, el tiempo necesario se puede reducir a alrededor de un mes. Estas pruebas se realizarán para tres tipos distintos de contabilización de aciertos y fallos de los enunciados en el capítulo 6: contabilizaciones por defecto periódico reales e híbridas y contabilización por defecto individual según su naturaleza. Para todos los casos se utilizarán las métricas de *Jaccard* y *F-Measure*.

Mediante estas pruebas, para cada tipo de contabilización, se obtendrá un valor por banda para cada una de las combinaciones de los parámetros de configuración. El modo en que se determinará la configuración óptima por cada tipo de métrica es el siguiente: para cada configuración, se calculará la media aritmética del valor proporcionado por la métrica para cada banda. La configuración para la que dicha media sea mayor, será elegida como configuración óptima para ese tipo de métrica. Aunque el diseño experimental factorial-completo propuesto explora gran parte del espacio de siete dimensiones formado por los parámetros de configuración, esta exploración no es exhaustiva, ya que hay parámetros de tipo entero con paso mayor que 1 (*MaxSkips* y *TTol*), y parámetros de tipo real que han de ser discretizados (*ARatio*, *LenRatio*, *WidRatio* y *YRatio*). Por este motivo es necesario realizar una exploración minuciosa alrededor de la configuración óptima para cada métrica. Para ello se plantean una serie de análisis de sensibilidad para cada parámetro. De este modo se podrá determinar cual o cuales de ellos son más sensibles a cambios, y por tanto, cuales son los parámetros cuyo valor deben ser establecido con mayor cuidado.

Una vez que se haya determinado la configuración óptima para cada métrica, ésta se utilizará para ejecutar la herramienta desarrollada sobre un conjunto de

bandas de *test*. La caracterización proporcionada en cada caso será analizada para determinar, según el criterio de un usuario experto, cual de ellas es la mejor. Igual que en el caso del entrenamiento, las bandas de *test* deben ser representativas de la realidad y tener distintas características. Se ha elegido un conjunto con igual número de bandas para realizar la fase de *test*, aunque todas ellas distintas de las bandas de entrenamiento. En la tabla 7.3 se muestran sus características.

7.2. Grid Computing

El *grid computing* es una tecnología que permite utilizar de forma coordinada todo tipo de recursos (entre ellos computación, almacenamiento o aplicaciones específicas) que no están sujetos a un control centralizado y pueden ser utilizados para resolver problemas que requieren una gran intensidad de computación en diversos campos, como ciencia, ingeniería o comercio. En este sentido, es una nueva forma de computación distribuida, en la cual los recursos pueden ser heterogéneos y estar conectados mediante redes de área extensa formando una infraestructura que permita la integración y el uso colectivo de ordenadores de alto rendimiento, redes y bases de datos administradas por diferentes instituciones. Esta tecnología ofrece la posibilidad de ver a este conjunto de dispositivos heterogéneos como un único recurso que posee las funcionalidades de cada uno de los componentes que lo forman [Baker *et al.*, 2002].

La gran capacidad de computación requerida para poder realizar la experimentación planteada en la sección 7.1, genera la necesidad de utilizar este tipo de tecnología para poder reducir el tiempo necesario para realizar la experimentación hasta unos límites razonables.

Concretamente, para realizar la experimentación mediante *grid computing* se dispone de un conjunto de computadores heterogéneos y localizados físicamente en edificios distintos (algunos de ellos pertenecen a laboratorios de prácticas). Puesto que algunos de estos computadores son utilizados para realizar las prácticas de varias asignaturas de la Universidad de Oviedo, se utilizarán como recursos de computación voluntaria. Esto significa que dichos computadores formarán parte del *grid*, pero sólo ejecutarán trabajos cuando no estén siendo utilizados de forma local por un usuario. De este modo, los ciclos de CPU que no realizarían ningún trabajo útil en aquellos momentos en los que cada uno de esos computadores estén desocupados pueden utilizarse para ejecutar tareas. Este planteamiento lleva en práctica varios años. Uno de los ejemplos más conocidos es la infraestructura BOINC [Anderson, 2004], que permite a cualquier usuario de un computador donar los ciclos de CPU que no vaya a utilizar a uno o varios proyectos de investigación científica. El primero de los proyectos que utilizaron esta infraestructura fue el proyecto *SETI@home* [SETI@home, 2011]. Este pro-

Tabla 7.3: Bandas seleccionadas para el *testing*

| ID | Material | Anchura (milímetros) | Longitud (metros) | Nº Defectos periódicos | Cilindros defectuosos | Nº Defectos ind. en d.p. | Nº Defectos individuales |
|------|--------------|-------------------------|----------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| T-1 | Low-Hard | 986 | 972 | 1 | 6 | 35 | 79 |
| T-2 | Low-Hard | 960 | 873 | 1 | 6 | 214 | 237 |
| T-3 | Low-Hard | 1260 | 1108 | 2 | 6 | 124 | 416 |
| T-4 | Low-Hard | 1252 | 506 | 1 | 5 | 39 | 116 |
| T-5 | Low-Hard | 1007 | 1385 | 2 | 6 | 113 | 276 |
| T-6 | Low-Hard | 1014 | 405 | 1 | 6 | 22 | 27 |
| T-7 | Low-Hard | 1526 | 842 | 2 | 6 | 89 | 528 |
| T-8 | Low-Soft | 1366 | 820 | 1 | 6 | 142 | 488 |
| T-9 | Low-Soft | 985 | 597 | 3 | 6 | 146 | 487 |
| T-10 | High-Soft-RS | 1256 | 642 | 2 | 5 y 6 | 340 | 585 |
| T-11 | Low-Soft | 1250 | 727 | 4 | 6 | 216 | 466 |
| T-12 | Low-Soft-RS | 1246 | 773 | 2 | 5 | 79 | 134 |
| T-13 | Low-Soft | 828 | 469 | 1 | 6 | 71 | 131 |
| T-14 | Low-Soft | 1566 | 659 | 1 | 6 | 43 | 313 |
| T-15 | Low-Soft | 1414 | 620 | 1 | 6 | 51 | 299 |
| T-16 | Low-Hard | 1526 | 865 | 5 | 5 y 6 | 395 | 770 |
| T-17 | Low-Hard | 975 | 1350 | 1 | 6 | 40 | 170 |
| T-18 | Low-Soft | 1283 | 575 | 1 | 6 | 97 | 377 |

yecto hacía uso de los ciclos de CPU no utilizados de millones de usuarios de todo el mundo para procesar señales de radio provenientes del espacio en busca de inteligencia extraterrestre [Anderson *et al.*, 2002]. La organización sin ánimo de lucro *World Community Grid* [WCG, 2011] que engloba varios proyectos que requieren computación masiva, como la investigación de enfermedades, desastres naturales o predicción meteorológica, también hacen uso de esta infraestructura. Otros ejemplos extendidos son el proyecto *Folding@home* [Folding@home, 2011], que realiza simulaciones del modo en que se pliegan las proteínas para poder investigar el modo en que se generan muchas enfermedades como el Alzheimer o el cáncer.

Adquirir computadores de altas prestaciones para realizar todos estos cálculos supondría un coste muy elevado. Utilizando un *grid* al que se incorporan aquellos usuarios que quieren donar los ciclos no utilizados de sus computadores de forma altruista, y se puede obtener una capacidad de cómputo muy grande con un coste bajo. Todos estos sistemas funcionan de un modo similar. Cuando los computadores que pertenecen al *grid* están inactivos, solicitan tareas para ejecutar. Mientras un computador no esté siendo utilizado, ejecuta esas tareas y envía los resultados de vuelta al servidor. Después, los computadores que sigan desocupados solicitan un nuevo trabajo. Dependiendo de qué tipo de *grid* se utilice y cómo esté configurado, cuando el usuario del computador comienza a utilizarlo cuando una tarea está ejecutándose, ésta puede pausarse para reanudarse más tarde (cuando el usuario haya dejado de utilizar el computador) o puede abortarse y enviarse a otro nodo disponible del *grid* para que la realice.

La idea planteada para realizar la experimentación es similar. Para aprovechar al máximo los recursos disponibles, se creará un *grid* al que se unirán un conjunto de computadores heterogéneos distribuidos por distintos edificios del Campus de Viesques, en Gijón (Universidad de Oviedo). Estos computadores proporcionarán recursos de computación al *grid* y ejecutarán trabajos cuando estén desocupados. En el momento en que se detecte la presencia de un usuario en ellos (porque se haya pulsado una tecla del teclado o se haya movido el ratón), la ejecución de los trabajos se detendrá, con el objetivo de que los usuarios de estos computadores no noten que éstos pertenecen al *grid*. De este modo las prestaciones de estos equipos no se verán reducidas por el hecho de formar parte del *grid*, y los alumnos que hagan uso de estos equipos podrán ejecutar cualquier programa exactamente en las mismas condiciones que si el computador no formara parte de él.

7.2.1. Herramientas grid

Los *middleware grid* o herramientas *grid*, son productos *software* que permiten la compartición, selección y agregación de recursos heterogéneos que pueden estar geográficamente dispersos. De este modo, el *middleware* integra a todos

los recursos que forman parte del *grid* proporcionando un acceso consistente y homogéneo a cada uno de ellos.

Las funcionalidades más deseables en un *middleware grid* son las siguientes:

- **Gestión de trabajos:** El *middleware* debe de encontrar el recurso más idóneo de los disponibles para ejecutar un determinado trabajo. Debe transferir automáticamente a dicho recurso todo lo necesario para poder realizar el trabajo indicado y reiniciar un trabajo (o transferirlo a otro recurso del *grid*) en caso de que haya tenido que detenerse o no pueda seguir utilizándose el mismo recurso.
- **Servicios de datos:** Estos servicios permiten el acceso a grandes cantidades de información en un entorno distribuido. Por ejemplo, permitirían el acceso y la compartición de información almacenada en bases de datos que están mantenidas y administradas independientemente. El *middleware* se encargaría de buscar el recurso (o recursos) que almacena la información solicitada por un usuario o buscaría el recurso más idóneo para almacenar información enviada por un usuario (entre otras muchas funcionalidades).
- **Gestión de recursos:** El *middleware* permite la gestión de los recursos físicos y lógicos del *grid* (puede desde reiniciar un equipo a configurar una red virtual). También puede permitir la gestión de los recursos del *grid* expuestos por interfaces de servicios (reserva de recursos, envío de trabajos) o gestionar la infraestructura del *grid* expuesta por interfaces de gestión (por ejemplo, monitorizar un servicio).
- **Seguridad:** Las funcionalidades de seguridad permiten aplicar determinadas políticas de seguridad dentro de una organización. Por ejemplo, puede ser necesario permitir el acceso al *grid* sólo a determinados usuarios, o que éstos puedan hacer uso sólo de ciertos recursos de éste. Entre otras muchas funcionalidades, el *middleware* puede encargarse de la detección de intrusos o *malware* en el *grid*, uso incorrecto de recursos o ataques.
- **Servicios de información:** Permite acceder y manipular información sobre aplicaciones, servicios y recursos. El *middleware* detecta nuevos recursos o servicios disponibles en el *grid* y monitoriza su estado.

Las principales herramientas de este tipo son (además de la ya mencionada BOINC) Globus [Globus, 2011] (proyecto comenzado en 1996 que cuenta con un amplio conjunto de herramientas para contruir *grids* [Foster y Kesselman, 1997]), G-lite [gLite, 2011] (utilizado en los experimentos del LHC en el CERN [Koblitz et al., 2008]), UNICORE [UNICORE, 2011] (desarrollado por el Ministerio de Educación Alemán en 1997 para permitir a los miembros de la comunidad científica poder hacer uso de recursos heterogéneos con distintas políticas de uso

y seguridad de un modo sencillo [Romberg, 2002]), ARC [ARC, 2011] (desarrollado para la comunidad científica de los países nórdicos para dar soporte a la ejecución de tareas de computación intensiva y con necesidad de almacenar grandes cantidades de información [Ellert *et al.*, 2007]) y Condor [Condor, 2011] (diseñado para una paralelización de grano grueso de tareas de computación intensiva [Thain *et al.*, 2005]). En la tabla 7.4 se comparan las funcionalidades ofrecidas por cada uno de estos *middlewares*.

| | Globus | gLite | UNICORE | ARC | BOINC | Condor |
|---------------------------|--------|-------|---------|-----|-------|--------|
| Gestión de trabajos | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Servicios de datos | ■ | ■ | □ | □ | □ | □ |
| Gestión de recursos | □ | □ | □ | □ | □ | ■ |
| Seguridad | ■ | ■ | ■ | □ | □ | □ |
| Servicios de información | ■ | ■ | □ | ■ | □ | ■ |
| Puede trabajar en Windows | ■ | □ | ■ | □ | ■ | ■ |

Tabla 7.4: Comparación de las características de *middleware*

Puesto que una gran parte de los computadores utilizados para la experimentación pertenecen a laboratorios de prácticas que tienen el sistema operativo Windows instalado, es necesario que el *middleware* elegido pueda funcionar en éste. En el caso de Globus (parcialmente) y UNICORE, se puede trabajar en Windows puesto que el *middleware* está hecho o dispone de una versión escrita en Java. En el caso de BOINC, sólo el cliente tiene una versión que funcione en Windows, mientras que el servidor debe de estar ejecutándose en una máquina Unix. En cambio, Condor sí que dispone de una versión compilada para funcionar en Windows. Aunque ésta proporciona menos funcionalidades que su versión para Unix, son suficientes para poder ejecutar las pruebas planteadas utilizando los equipos disponibles. Puesto que no va a ser necesario almacenar grandes cantidades de información, ni se va a utilizar el grid para compartir datos y sólo va a ser utilizado para la ejecución de dichas pruebas (con lo cual no son necesarias unas grandes medidas de seguridad), la funcionalidad ofrecida por Condor es la más adecuada para la ejecución de dichas pruebas. Por estos motivos, el *grid* que se utilizará para ejecutar las pruebas se creará utilizando este *middleware*.

7.2.2. Condor

Según la página web de Condor, el objetivo del *Proyecto Condor* es desarrollar, implementar, desplegar y evaluar mecanismos y políticas que den soporte a la computación de alta productividad (*High-Throughput Computing* o HTC) para grandes conjuntos de recursos distribuidos. Según esto, Condor puede gestionar una elevada capacidad computacional proporcionada por un conjunto de recursos heterogéneos y dispersos durante largos periodos de tiempo.

Condor es un sistema administrador de carga de trabajo para tareas que requieren una alta intensidad computacional. Proporciona políticas de planificación [Tannenbaum *et al.*, 2001a], [Tannenbaum *et al.*, 2001b] y mecanismos de gestión y monitorización de trabajos y recursos. En la figura 7.1 se muestra un resumen del estado de los trabajos que están siendo ejecutados en un *grid* Condor en un determinado instante. Se muestra información del estado de cada trabajo, cuanto tiempo lleva ejecutándose, el usuario que lo envió, su identificador y alguna información adicional (Condor permite mostrar un informe sobre el estado de cada tarea mucho más extenso). En la figura 7.2 se muestra el estado de los distintos recursos que forman el *grid* en un instante determinado. Concretamente para cada recurso se muestra su arquitectura, sistema operativo, estado (ejecutando tareas, inactivo o usado de forma local por su propietario), carga promedio, memoria instalada y tiempo de actividad (igual que antes, también puede obtenerse más información sobre cada recurso).

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
C:\Documents and Settings\Usuario>condor_q

-- Submitter: infor16.epv.uniovi.es : <156.35.171.63:1032> : infor16.epv.uniovi.
es
ID      OWNER   SUBMITTED  RUN TIME ST PRI SIZE CMD
10337.0 Usuario  7/5  14:55  0+00:01:34 R 0  0.0 Dcc.bat
10338.0 Usuario  7/5  14:55  0+00:01:34 R 0  0.0 Dcc.bat
10339.0 Usuario  7/5  14:55  0+00:01:33 R 0  0.0 Dcc.bat
10340.0 Usuario  7/5  14:55  0+00:01:33 R 0  0.0 Dcc.bat
10341.0 Usuario  7/5  14:55  0+00:01:33 R 0  0.0 Dcc.bat
10342.0 Usuario  7/5  14:55  0+00:01:33 R 0  0.0 Dcc.bat

6 jobs; 0 idle, 6 running, 0 held
C:\Documents and Settings\Usuario>

```

Figura 7.1: Monitorización de los trabajos en Condor

Los usuarios envían los trabajos a realizar a Condor, y éste, en función de las políticas establecidas, elige qué recurso se encargará de ejecutar el trabajo y avisará al usuario una vez éste haya finalizado, proporcionándole los resultados tal y como se representa en la figura 7.3.

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
C:\Documents and Settings\Usuario>condor_status

Name                OpSys      Arch      State      Activity LoadAv  Mem      ActvtyTime
slot1@atc68.edu.un  WINNT51   INTEL    Claimed   Busy      0.000    894      0+00:00:00
slot2@atc68.edu.un  WINNT51   INTEL    Unclaimed Idle      0.000    894      0+01:06:11
slot3@atc68.edu.un  WINNT51   INTEL    Unclaimed Idle      0.000    894      1+05:34:51
slot4@atc68.edu.un  WINNT51   INTEL    Unclaimed Idle      0.000    894      1+05:34:52
slot1@atc69.edu.un  WINNT51   INTEL    Unclaimed Idle      0.000    894      0+18:48:59
slot2@atc69.edu.un  WINNT51   INTEL    Unclaimed Idle      0.000    894      0+18:49:00
slot3@atc69.edu.un  WINNT51   INTEL    Unclaimed Idle      0.000    894      0+02:32:36
slot4@atc69.edu.un  WINNT51   INTEL    Unclaimed Idle      0.000    894      0+18:49:02
atc96.edu.uniovi.e  WINNT51   INTEL    Claimed   Busy      0.000    765      0+00:00:00
slot1@infor16.epv.  WINNT51   INTEL    Owner     Idle      0.000    822      0+00:05:09
slot2@infor16.epv.  WINNT51   INTEL    Owner     Idle      0.000    822      0+00:05:10
slot3@infor16.epv.  WINNT51   INTEL    Owner     Idle      0.000    822      0+00:05:11
slot4@infor16.epv.  WINNT51   INTEL    Owner     Idle      0.000    822      0+00:05:12
m1n1                 WINNT51   INTEL    Unclaimed Idle      0.050    765      0+00:56:04
tecgrid01            WINNT51   INTEL    Owner     Idle      0.010    765      20+05:07:23
slot1@atc138.edu.u  WINNT52   INTEL    Claimed   Busy      0.000    1023     0+00:00:30
slot2@atc138.edu.u  WINNT52   INTEL    Claimed   Busy      0.000    1023     0+00:00:25
slot1@atc139.edu.u  WINNT52   INTEL    Claimed   Busy      0.000    1023     0+00:00:21
slot2@atc139.edu.u  WINNT52   INTEL    Claimed   Busy      0.000    1023     0+00:00:11

Total Owner Claimed Unclaimed Matched Preempting Backfill
INTEL/WINNT51      15      5      2      8      0      0      0
INTEL/WINNT52       4      0      4      0      0      0      0
Total              19      5      6      8      0      0      0
    
```

Figura 7.2: Monitorización de los recursos en Condor

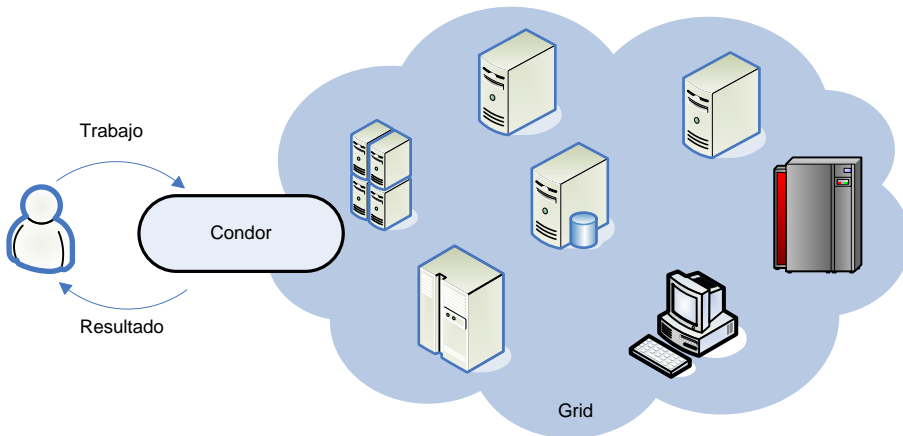


Figura 7.3: Abstracción del funcionamiento de Condor

Además, Condor permite gestionar y controlar computadores con ciclos de CPU no utilizados de tal modo que no se desaproveche capacidad de cómputo. Puesto que cada uno de los recursos que integren un *grid* Condor puede tener

un propietario distinto que aplique distintas políticas de uso a éstos, el *middleware* de Condor debe de ser flexible para poder adaptarse a cada una de ellas. Normalmente, los propietarios de los recursos no estarán dispuestos a donarlos (completa o parcialmente) si no van a poder seguir manteniendo un cierto control sobre ellos. Además, Condor debe de ser tolerante a fallos. Cada uno de estos recursos puede fallar o puede desconectarse del *grid* o de la red en cualquier momento, por lo que se debe de estar preparado para tratar de reasignar las tareas que éstos estuvieran realizando a otro recurso del *grid*.

La arquitectura de Condor se basa, además de en *High-Throughput Computing* en *Opportunistic Computing*. Éste último proporciona a Condor la posibilidad de hacer uso de recursos tan pronto como éstos estén disponibles y sin requerir una disponibilidad del 100 % por parte de ellos. Para proporcionar estas funcionalidades, Condor dispone de las siguientes herramientas:

- **ClassAds:** Un lenguaje de programación que permite especificar los requisitos que serán tenidos en cuenta para realizar el *matching* entre los trabajos a realizar y los recursos disponibles.
- **Checkpoints:** Periódicamente, Condor guarda el estado de los trabajos de forma automática y transparente. En caso de que el recurso que está dedicado a un trabajo determinado no pueda continuar, el trabajo puede migrarse a otro recurso y continuar el trabajo en lugar de tener que empezar desde el principio. Esta funcionalidad no está disponible en la versión Condor para Windows.
- **Llamadas al sistema remotas:** Condor permite mantener un entorno de ejecución local en la máquina que envió el trabajo mediante el uso de llamadas al sistema remotas cuando los trabajos a realizar tienen entrada-salida (sólo disponible en la versión de Unix).

Para sacar el mayor provecho de los recursos disponibles en el *grid*, Condor puede configurarse para especificar cuando puede utilizarse cada recurso. Puede indicarse que un recurso puede ser utilizado siempre o sólo cuando se cumpla una determinada condición (como por ejemplo, que lleve 15 minutos sin actividad por parte de un usuario local).

Al conjunto de máquinas donde se ejecuta el software Condor se denomina *pool*. Cada uno de los computadores que conformen un *pool* tendrá uno o más de los siguientes roles:

- **Administración Central:** sólo puede haber uno en el *pool*. Este computador se encarga de recoger la información de funcionamiento del *pool* y de la negociación entre los recursos disponibles y los requisitos de cada petición.

- Ejecución de tareas: cualquier computador, incluido el administrador central, puede configurarse para ejecutar tareas. Cuanto mayores sean los recursos de un computador, mayores serán los requisitos que pueda satisfacer de una determinada petición.
- Envío de tareas: cualquier computador, incluido el administrador central, puede ser configurado para enviar tareas.

Cada uno de estos tres roles puede seguir su propia política. Por ejemplo, un equipo de envío de trabajos puede demandar que los equipos que ejecuten los trabajos enviados por él utilicen un determinado sistema operativo o tengan más de cierta cantidad de memoria RAM. Del mismo modo, un equipo dedicado a ejecutar trabajos puede configurarse para ser utilizado por cualquier usuario pero dando prioridad a un determinado usuario o colectivo, poder ser utilizado en cualquier momento o sólo cuando no haya ningún usuario haciendo uso de la máquina de forma local. El administrador central también puede configurarse para que permita hacer uso del *pool* a cualquier usuario o sólo a algunos, o puede poner restricciones en el uso del *pool* a un determinado usuario o colectivo. Todas estas preferencias se especifican utilizando ClassAds, como los mostrados en la figura 7.4.

ClassAd de un trabajo

```
[
MyType = "Job"
TargetType = "Machine"
Requirements = (Arch == "INTEL") &&
(OpSys== "LINUX") && ((Memory *
1024)>=ImageSize)
Owner = "bulnes"
DiskUsage = 10000
]
```

ClassAd de una máquina

```
[
MyType = "Machine"
TargetType = "Job"
Machine = "infor16.epv.uniovi.es"
Requirements = (KeyboardIdle >
(15*60))
Arch = "INTEL"
OpSys = "WINNT51"
Disk = 51265230
]
```

Figura 7.4: Ejemplos de ClassAds para un trabajo y una recurso de ejecución

Un usuario, mediante un computador de envío de tareas, puede enviar trabajos al *grid*. La máquina que actúa de administrador central se encarga de buscar un recurso compatible para cada trabajo a ejecutar. Para que esto pueda llevarse a cabo, el administrador central debe de conocer en todo momento todos los elementos que componen el *grid*, así como los computadores que pueden enviar tareas como los que se utilizarán para ejecutarlas. Cada vez que un recurso nuevo se añade al *grid*, ha de hacerselo saber al administrador central. Para tratar de conseguir un aprovechamiento óptimo de todos los recursos pertenecientes a cada *pool* de Condor, en 1994 se desarrolló el *gateway flocking* [Epema *et al.*, 1996],

que permitía conectar varios *pools* de tal modo que un usuario de un *pool* pudiera utilizar una máquina de otro *pool* cuando sus trabajos no podían ejecutarse en ninguna de las máquinas de su propio *pool*.

Para que la máquina que actúa de administrador central pueda asignar un recurso a un trabajo, éste examina los correspondientes *ClassAds* y comprueba que los requisitos del trabajo son compatibles con los requisitos de la máquina. Una vez que el administrador central decide qué recurso de ejecución de tareas se encargará de un determinado trabajo, pone en contacto a ambos. En cada uno de ellos se creará un proceso nuevo. En el equipo que envía el trabajo un proceso *shadow*, encargado de proporcionar todo lo necesario para que el otro equipo pueda ejecutar el trabajo, como el fichero ejecutable, los argumentos de éste, ficheros de entrada, etc. Asimismo, en el equipo que ejecuta el trabajo se creará un proceso *sandbox* que creará un entorno de ejecución para el trabajo y solicitará al proceso *shadow* correspondiente toda la información necesaria para ejecutar el trabajo asignado. Este proceso se encargará de emular el entorno de trabajo del proceso enviado por *shadow* de tal modo que éste se ejecute como si estuviera funcionando en la máquina que envió el trabajo y además protegerá el equipo de cualquier daño que pudiera producir la ejecución de dicho trabajo en él (bien porque éste no funcione bien o porque haya sido programado deliberadamente para realizar algún tipo de tarea maliciosa).

Condor también permite definir distintos entornos de ejecución mediante *universos* [Ruda *et al.*, 2007]. La versión 6.4.7 de Condor (la más reciente a la fecha de escritura de esta tesis) soporta los siguientes universos:

- **Standard:** Es el universo que permite realizar *checkpoints* y migración de trabajos entre recursos. No está soportado por la versión para Windows. Presenta varias restricciones reseñables, como carecer de la posibilidad de ejecutar procesos multihilo y de comunicación entre procesos y que todos los programas a ejecutar en este universo deben ser enlazados con las librerías de Condor.
- **Vanilla:** Se utiliza para ejecutar trabajos que no pueden ser enlazados con las librerías de Condor. Tiene la ventaja de poder ejecutar cualquier tipo de programa. No soporta *checkpoints*, migración ni llamadas al sistema remotas. En este universo, cuando el computador que está ejecutando un trabajo no puede continuar haciéndolo, se dispone de dos alternativas: suspender el trabajo y continuar en el mismo computador cuando sea posible o ejecutarlo en otro computador comenzando desde el principio. Los procesos que necesiten entrada/salida pueden utilizar un sistema de ficheros compartido o redireccionar a ficheros.
- **Parallel Virtual Machine (PVM):** Permite que programas escritos para

(*Parallel Virtual Machine*) [PVM, 2011] utilicen el entorno de *Opportunistic Computing* de Condor.

- Message Passing Interface (MPI): Permite que programas escritos para MPICH [MPICH, 2011] utilicen el entorno de *Opportunistic Computing* de Condor.
- Globus: Utilizado para ejecutar trabajos Globus sobre un *grid* Condor.
- Java: Permite ejecutar trabajos escritos en Java.
- Scheduler: Permite ejecutar trabajos con diferentes condiciones de ejecución. Es muy útil para ejecutar trabajos que dependan de otros, permitiendo elegir el orden en que éstos deben ejecutarse.

7.3. Grid diseñado para la experimentación

Para realizar la experimentación se creará un *pool* Condor que dispondrá de un administrador central y 29 computadores dedicados a la ejecución de tareas que contarán con 63 núcleos en total. El administrador central no ejecutará tareas, para que pueda disponer de toda su capacidad de computación para coordinar el resto de computadores del modo más eficiente posible. El resto de computadores pertenecientes al *pool* podrán ejecutar tareas, mientras que sólo el administrador central y otro de los equipos del *pool* podrán enviar tareas para su ejecución. En la tabla 7.5 se muestran las características de los computadores utilizados para formar el *pool* y el número de ellos disponible.

Tabla 7.5: Computadores utilizados para la experimentación

| CPU | Memoria | Núcleos | Nº comp. | Total núcleos |
|------------------|---------|-------------|----------|---------------|
| Intel Core2 Duo | 2GB | 2 @ 2.3GHz | 24 | 48 |
| Intel Core i5 | 4GB | 4 @ 2.73GHz | 2 | 8 |
| Intel Core2 Quad | 4GB | 4 @ 2.6GHz | 1 | 4 |
| Intel Pentium 4 | 768MB | 1 @ 2.4GHz | 2 | 2 |
| Intel Core2 Duo | 2GB | 2 @ 2.6GHz | 1 | 2 |

A efectos de estructura lógica dentro del *grid*, un nodo es un núcleo de un computador, no un computador completo, de tal modo que un equipo con cuatro núcleos cuenta como cuatro nodos dentro del *grid*. De este modo, el *grid* creado dispone de 64 nodos, de los cuales 63 estarán dedicados a la ejecución de tareas

y uno a administrar el *grid*. La distribución física de los equipos se muestra en la figura 7.5.

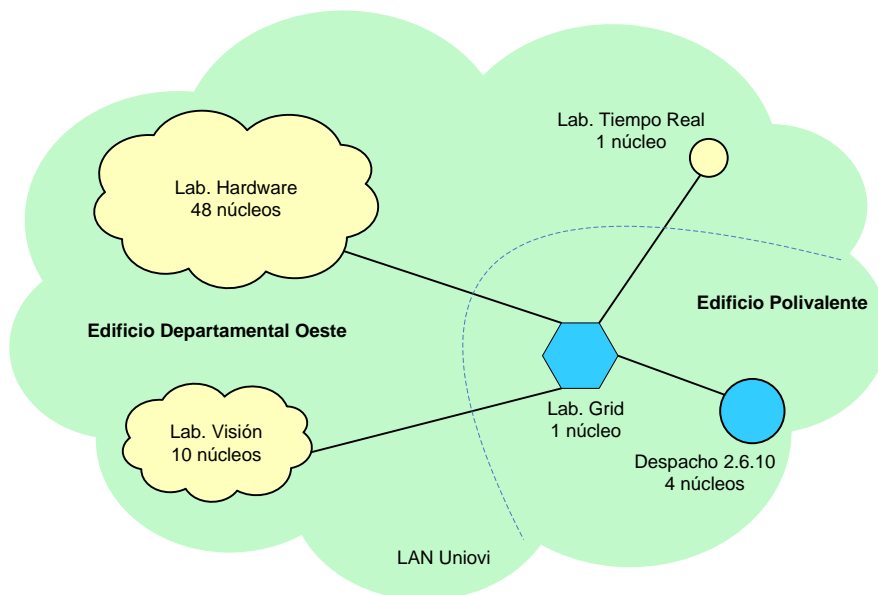


Figura 7.5: Estructura del *grid*

Las nubes se corresponden con ubicaciones físicas donde hay varios computadores juntos, mientras que los círculos se corresponden con ubicaciones con un sólo equipo (aunque éste tenga varios núcleos). Los nodos pintados en azul son los que pueden enviar tareas al *grid* y los pintados en amarillo sólo pueden ejecutar las tareas que reciban del administrador central (representado por un hexágono). Además de estar localizados los nodos en ubicaciones físicas distintas y tener distintas características, también hay diversidad en cuanto al sistema operativo instalado en ellos. Todos los equipos tienen Windows XP SP3 salvo 12 de los 24 equipos del Laboratorio de Hardware (Intel Core2 Duo 2.3GHz) que tienen instalado Windows 2003 Server.

Como ya se comentó anteriormente, Condor permite configurar cada nodo para que ejecute tareas siempre, sólo cuando no haya actividad en él, o cuando el uso de sus recursos está por debajo de un cierto umbral. En este caso, todos los computadores, salvo el ubicado en el laboratorio de tiempo real, se van a configurar de tal forma que sólo ejecuten tareas cuando no haya ningún usuario haciendo uso de ellos. Si un usuario comienza a utilizar uno de estos

computadores, las tareas que se estén ejecutando en cada uno de sus núcleos serán suspendidas. Un nodo sólo volverá a ejecutar tareas tras 15 minutos de inactividad. El computador del laboratorio de tiempo real, al no ser utilizado por ninguna otra persona de la Universidad y estar dedicado exclusivamente a ejecutar tareas en este *pool*, se configurará para ejecutar tareas todo el tiempo, aunque un usuario acceda a él de forma local.

Según cual sea la naturaleza de las aplicaciones o los experimentos que deben ser ejecutados por el *grid*, puede darse el caso de que haya ejecuciones que sean dependientes de otras, es decir, que los resultados proporcionados por una determinada tarea (o tareas) sean necesarios para la ejecución de otras. Sin embargo, el tipo de carga de trabajo en este caso es *embarrassingly parallel*, definida en [Foster, 1995] como aquella carga que requiere poco o ningún esfuerzo para ser paralelizada, y que se traduce en un conjunto de ejecuciones independientes que no presentan dependencia entre ellas ni requieren de ningún tipo de comunicación. Puesto que en las pruebas planteadas lo único que se pretende es ejecutar la herramienta para un conjunto de parámetros de entrada, ésta ha de ejecutarse una vez para cada una de las combinaciones posibles, sin importar el orden ni qué nodo del *grid* lo haga. De este modo, no es necesario establecer ningún criterio sobre el orden en que cada ejecución debe ser realizada por el *grid*, simplemente éstas serán agrupadas en tareas y enviadas al *grid*, que las pondrá en una cola de ejecución y las irá ejecutando según la disponibilidad de cada nodo del *pool*. Por estos motivos, no será necesario el uso de los universos *Scheduler*, *MPI* o *PVM*. Puesto que el universo *Standard* no está disponible en la versión de Windows, el universo más adecuado para realizar la experimentación es el universo *Vanilla*.

El diseño factorial completo propuesto para estas pruebas implica un número muy elevado de ejecuciones de la herramienta desarrollada. Puesto que cada ejecución requiere unos 6 segundos de computación (de media), no parece adecuado hacer una comunicación con el servidor central para solicitar los datos correspondientes a una única ejecución de la herramienta y posteriormente otra comunicación para devolver los resultados obtenidos, ya que el tiempo empleado en estas comunicaciones puede ser significativo en relación al tiempo empleado en realizar dicha ejecución. Para solucionar este problema, Condor permite realizar la agrupación de un número prefijado de ejecuciones. Cada una de estas agrupaciones recibe el nombre de *tarea*. Aunque cada tarea esté formada por un conjunto de ejecuciones independientes, Condor trata a la tarea completa como una única entidad y puesto que el universo *Vanilla* no soporta *checkpoints* ni migración, cada tarea deberá ejecutarse de forma completa en un nodo del *grid*. Si un nodo sólo puede completar la mitad de las ejecuciones de una tarea, los resultados obtenidos no serán enviados al equipo que envió la tarea, si no que ésta comenzará de nuevo en otro computador del *grid* (o será puesta en cola en el caso de que no haya ninguno disponible en ese momento). Por estos motivos,

el número de ejecuciones de la herramienta en cada tarea debe de ser elegido cuidadosamente. Si cada tarea está constituida por un número pequeño de ejecuciones, el tiempo empleado en las comunicaciones entre los elementos del *grid* que intervienen en la ejecución de dicha tarea será significativo en relación al tiempo empleado en ejecutar dicha tarea. Por el contrario, si el número de tareas es muy elevado el tiempo de ejecución de dicha tarea será también elevado, con lo que aumenta la probabilidad de que una tarea sea interrumpida. En este caso, el hecho de recomenzar sería muy negativo, puesto que supondría haber desperdiciado mucho tiempo de cómputo. Con el fin de que no se produzca ninguna de estas dos situaciones, el número de ejecuciones de la herramienta por cada tarea será tal que cada una tenga una duración estimada de 30 minutos aproximadamente. Esto supone realizar tareas compuestas por 300 ejecuciones.

Para automatizar el envío de las tareas al *grid* y las posteriores tareas de recoger y manipular los resultados se han creado tres *scripts* escritos en *Python*. El primero de estos *scripts* se encarga de enviar las tareas al *grid*. Para ello realiza los siguientes pasos:

1. En función del número de valores a evaluar para cada parámetro y el número de ejecuciones que debe de haber en cada tarea (ambos datos están parametrizados para poder ser fácilmente modificables), se crea el número necesario de tareas, para la cual queda especificado qué combinaciones de parámetros corresponden a cada ejecución. Lanzar una tarea consistirá en ejecutar un fichero *.bat* creado por el *script* donde se ejecute la herramienta de caracterización con los correspondientes valores de parámetros.
2. Para cada tarea, el *script* crea una carpeta con los ficheros necesarios para su ejecución: un fichero *.bat* con las ejecuciones a realizar, el fichero de base de datos original, el fichero de base de datos con el *ground truth*, el fichero ejecutable de la herramienta de caracterización y el fichero de descripción del trabajo correspondiente.
3. Enviar cada una de las tareas al *grid*.

El fichero de descripción del trabajo debe de especificar el modo en que se ejecutará la tarea: ficheros necesarios, requisitos, universo, etc. En la figura 7.6 se muestra uno de los ficheros generados para realizar la experimentación.

Este fichero contiene toda la información necesaria sobre como debe Condor ejecutar la tarea. En este caso se establece que el universo a utilizar es *Vanilla*, el fichero que se debe lanzar para ejecutar la tarea y los ficheros donde se guardarán la salida, el log y los errores que se produzcan durante la ejecución. Además, se especifican los requisitos de la tarea (que utilizará el administrador para realizar el *matching* con los recursos disponibles) que son una máquina de arquitectura Intel con un sistema operativo Windows XP (WINNT51) o Windows 2003

```
Tarea-1286846-0.sub

[
Universe      = vanilla
Executable    = Dcc.bat
output        = Dcc.out
error         = Dcc.error
log           = Dcc.log
Requirements=(Arch == "INTEL") && ((OpSys == "WINNT52") || (OpSys == "WINNT51"))
should_transfer_files = YES
when_to_transfer_output = ON_EXIT
transfer_input_files = C:\Doc\9Marzo\DCC.exe,
                      C:\Doc\9Marzo\Metrics-1286846-0.txt,
                      C:\Doc\9Marzo\DP3.mdb,
                      C:\Doc\9Marzo\DP3_GT.mdb,
                      C:\Doc\9Marzo\config.txt
transfer_output_files = Metrics-1286846-0.txt
Queue
]
```

Figura 7.6: Fichero de descripción de una tarea

Server (WINNT52). Se especifican los ficheros que deben ser transferidos a la máquina que ejecutará la tarea (todos los ficheros que necesita la herramienta de caracterización), el fichero donde escribe los resultados la herramienta y el momento en que se transferirá dicho fichero al computador que lanzó la tarea.

Una vez que todas las tareas se hayan ejecutado por completo y se disponga de los ficheros de salida generados por la herramienta para cada tarea (cada fichero de salida contendrá el valor de métrica para las combinaciones de los valores de los parámetros correspondientes a dicha tarea), el segundo *script* se encarga de combinarlos adecuadamente, puesto que el fichero de salida de cada tarea es dejado por Condor en el directorio de esa tarea. Una vez ejecutado el *script*, se dispondrá de un fichero para cada una de las bandas de entrenamiento con el valor de métrica de cada combinación de valores de parámetros en orden, igual que si todas esas ejecuciones se hubieran realizado en la máquina local secuencialmente.

El tercer *script* determina qué configuración de parámetros es la mejor realizando los siguientes pasos:

1. Lee los ficheros de salida de cada banda.
2. Para cada combinación de parámetros, obtiene el valor de métrica obtenido por cada banda y calcula la media aritmética.
3. Elige la combinación de parámetros cuyo valor de métrica promedio es mayor.

Mediante este diseño experimental puede obtenerse la mejor configuración de parámetros para cada uno de los métodos de contabilización de aciertos y fallos seleccionados en la sección 6.4 con una interacción mínima por parte del usuario. Lo único que éste debe hacer es lanzar los *scripts* y dejar que el *grid* realice todo el trabajo, sabiendo que el propio *middleware* gestionará adecuadamente los recursos disponibles. Mediante las herramientas de monitorización que proporciona Condor, puede comprobarse periódicamente si todos los nodos del *grid* están funcionando correctamente. En caso contrario, mediante esta herramienta puede saberse qué nodo no está funcionando y cual es el motivo (si se ha caído, no aparecerá en la lista de recursos del *grid*, y si está correctamente añadido al *grid* pero no ejecuta tareas, Condor escribirá en el fichero de error correspondiente el motivo de su mal funcionamiento). De este modo es muy sencillo comprobar que en todo momento se está utilizando toda la potencia de cómputo disponible en el *grid*.

Capítulo 8

Resultados

Una vez enviadas al *grid* todas las pruebas planteadas en la sección 7.1 y habiendo combinado y organizado adecuadamente los resultados mediante los *scripts* realizados, hay que interpretar los resultados obtenidos en cada caso y compararlos con los obtenidos por el sistema Parsytec. Puesto que se habían planteado las pruebas utilizando distintos métodos de contabilización de aciertos y fallos, también ha de evaluarse la solución proporcionada por el sistema Parsytec para cada una de las bandas de *test* utilizando cada uno de estos métodos de contabilización. De este modo, las soluciones de la herramienta de caracterización y Parsytec pueden ser comparadas. Puesto que el sistema Parsytec es uno de los sistemas más ampliamente utilizados mundialmente en la industria para inspeccionar los procesos de fabricación de bandas de acero y su correspondiente detección de defectos, es una buena referencia que ayudará a valorar la calidad de las detecciones de defectos periódicos realizadas por la herramienta desarrollada.

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos por la herramienta de caracterización para cada uno de los métodos de contabilización de aciertos y fallos propuestos utilizando el conjunto de bandas de entrenamiento. Dichos resultados serán utilizados para obtener la configuración óptima para cada tipo de contabilización. Posteriormente, estas configuraciones serán utilizadas para detectar defectos periódicos mediante la herramienta de caracterización en el conjunto de bandas de *test*, para el cual se dispone del *ground truth* y de la detección realizada por el sistema Parsytec. Finalmente, la calidad de las soluciones obtenidas con las configuraciones óptimas será analizada para determinar qué método de contabilización (y por tanto qué configuración óptima) es la más adecuada para establecer como configuración definitiva.

8.1. Fase de entrenamiento

A continuación se muestran los resultados obtenidos durante la fase de entrenamiento para los cuatro tipos de contabilización de aciertos y fallos seleccionados: contabilización por defecto periódico binaria (DPB), por defecto periódico

híbrida (DPH), por defecto periódico real (DPR) y por defecto individual según naturaleza (DI).

8.1.1. Contabilización por defecto periódico binaria (DPB)

Para este método de contabilización se ha obtenido la misma configuración óptima de parámetros para las métricas de *Jaccard* y *F-Measure*. Dicha configuración se muestra en la tabla 8.1.

Tabla 8.1: Configuración de parámetros óptima para DPB

| Parámetro | Jaccard y F-Measure |
|-----------|---------------------|
| MinDefs | 12 |
| MaxSkips | 10 |
| ARatio | 100 |
| WidRatio | 100 |
| LenRatio | 100 |
| TTol | 52 |
| YRatio | 5 |

En la gráfica de barras mostrada en la figura 8.1 se comparan las soluciones proporcionadas por la herramienta desarrollada utilizando esta configuración y el sistema Parsytec.

En los resultados mostrados en esta figura se puede observar el problema mencionado en la subsección 6.2.2, donde se comentaba la problemática de la contabilización por defecto periódico binaria. El hecho de atribuir un valor de contabilización 0 ó 1 a un defecto periódico sin importar el número de defectos individuales que lo constituyen tiene como consecuencia que los defectos periódicos pequeños tienen más peso del que deberían. A efectos de producción industrial, son más graves los defectos periódicos con más defectos individuales, con lo que otorgar a todos la misma importancia no parece adecuado. En este caso, para tratar de detectar todos los defectos periódicos presentes en el conjunto de bandas de entrenamiento, la configuración que mejores resultados ofrece de forma global es una configuración demasiado permisiva en lo referido al tamaño de los defectos periódicos a detectar, siendo el número mínimo de defectos individuales que deben tener éstos de tan sólo 12. Esta configuración permite que la herramienta de caracterización consiga detectar los defectos periódicos más pequeños presentes en el conjunto de bandas de entrenamiento, aunque facilita la detección de falsos positivos en aquellas bandas con una

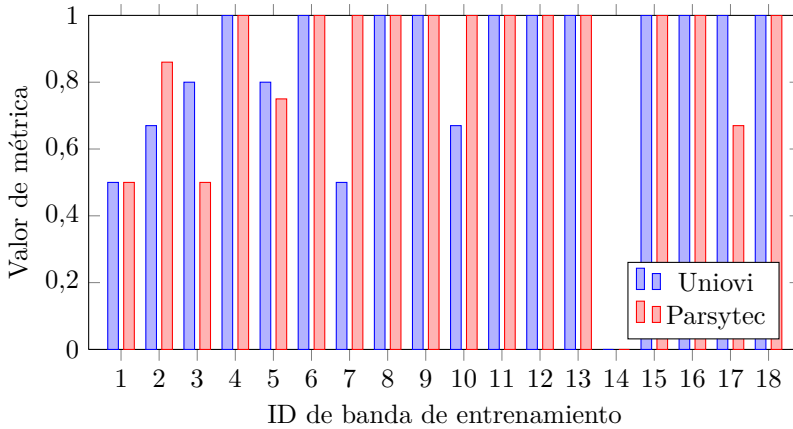


Figura 8.1: Comparativa utilizando contabilización DPB

mayor densidad de defectos superficiales. Esto ha ocurrido en las bandas E-3, E-10 y E-7, donde se han encontrado 1 falso positivo en las dos primeras y 2 falsos positivos en la última. Aún así, los defectos periódicos que están formados por un número de defectos individuales inferior a 12 (valor determinado para el parámetro *MinDefs*) no pueden ser detectados, y cuentan a la hora de calcular las métricas como falsos negativos. Esto ha ocurrido también para las bandas E-1, E-2 y E-5, donde para las dos primeras se han contabilizado 2 falsos negativos y 1 para la última. En términos generales, los resultados proporcionados por la herramienta de caracterización y el sistema Parsytec son prácticamente idénticos. Los defectos periódicos más sencillos de detectar con este método de contabilización (los que tienen más defectos individuales), han sido detectados por ambas herramientas en todos los casos. Los valores de métrica promedio de todo el conjunto de bandas de entrenamiento para las métricas de *Jaccard* y *F-Measure* se muestran en la figura 8.2. Utilizando la métrica de *Jaccard* se obtuvo un valor de 0,78 para la herramienta de caracterización y de 0,80 para el sistema Parsytec. Igualmente, utilizando *F-Measure*, el valor promedio obtenido por la herramienta de caracterización ha sido de 0,83 y el valor obtenido por el sistema Parsytec fue de 0,85.

Mediante la realización de un análisis de sensibilidad se puede comprobar la variación sufrida por el valor de la métrica ante la variación de cada uno de los valores de los parámetros en torno a la configuración óptima determinada en esta sección. En el caso de los parámetros morfológicos, los valores de la métrica son muy bajos cuando el valor del parámetro es bajo, y aumenta linealmente hasta llegar a su valor máximo, a partir del cual el valor de métrica se mantiene

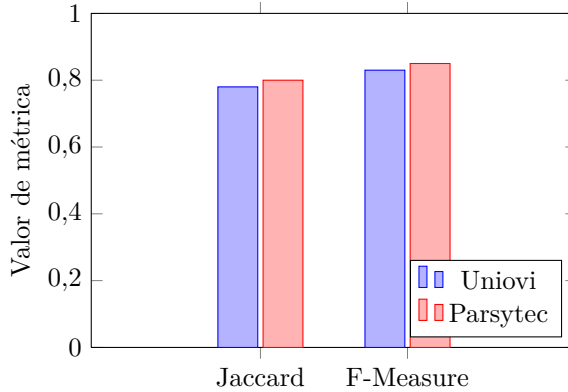


Figura 8.2: Resultados obtenidos para el método DPB

constante ante más variaciones del parámetro. En la figura 8.3(a) se muestran los valores de las métricas *F-Measure*, *Precision* y *Recall* ante variaciones del parámetro *ARatio* para la banda E-1 y en la figura 8.3(b) se muestra el valor de las mismas métricas ante variaciones del parámetro *LenRatio* para la banda E-5¹. Aunque los valores de la métrica *F-Measure* (en azul), *Precision* (en rojo) y *Recall* (en verde) son diferentes, la forma de las curvas es similar en ambos casos, así como para el resto de las gráficas de parámetros morfológicos de todas las bandas de entrenamiento.

En el caso de los parámetros morfológicos es sencillo establecer unos valores que funcionen adecuadamente para todo tipo de bandas. En todos los casos los mejores valores de la métrica se obtienen con valores grandes de los parámetros, debido a la imprecisión del sistema de vision por computador a la hora de determinar las dimensiones de los defectos. No ocurre así con el parámetro *MinDefcs*, que el establecerle un valor muy pequeño o un valor muy grande puede hacer disminuir el valor de la métrica hasta cero o valores cercanos a cero. En la figura 8.4 se muestran las gráficas correspondientes a los análisis de sensibilidad de este parámetro para cuatro bandas de entrenamiento. La figura 8.4(a) refleja dicho análisis para la banda E-13, que tiene sólo un defecto periódico. Cuando el parámetro *MinDefcs* es muy pequeño, aparecen en la solución varios defectos falsos positivos, puesto que en bandas con una densidad de defectos alta, es relativamente sencillo que un conjunto pequeño de defectos individuales cumplan las condiciones de defecto periódico por azar. La aparición de falsos positivos provoca que la métrica *Precision* sea baja, lo que hace bajar también el valor de

¹Por motivos de espacio, en los siguientes gráficos se omitirá la leyenda y el rótulo del eje Y, al ser idénticos en todos ellos.

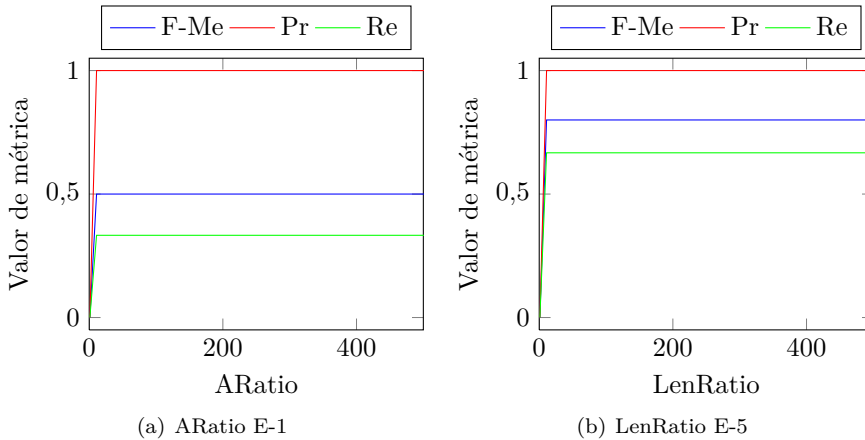


Figura 8.3: Análisis de sensibilidad de parámetros morfológicos con DPB

F-Measure. Adicionalmente, cuando el parámetro *MinDefs* es muy grande, los defectos periódicos que realmente existen en la banda pueden quedar sin detectar. Concretamente, cuando el valor establecido para este parámetro es superior al número de defectos individuales que forman un defecto periódico del *ground truth* es imposible que la herramienta de caracterización lo pueda detectar. Por este motivo la métrica *Recall* desciende. Este comportamiento también puede observarse para las bandas E-2 y E-5, ambas con varios defectos periódicos en su *ground truth*, mostrados en las figuras 8.4(c) y 8.4(d) respectivamente. A medida que se incrementa el valor de *MinDefs* disminuye la métrica *Precision* al aparecer falsos positivos. Al mismo tiempo la métrica *Recall* baja, ya que dejan de detectarse algunos de los defectos periódicos presentes en el *ground truth* para dichas bandas. Para la mayoría de las bandas de entrenamiento, el valor del parámetro *MinDefs* para la configuración óptima, 12, está en la parte inicial de la meseta que suele dibujar la métrica *F-Measure*. Concretamente, en la banda E-5 coincide con el punto en que se cortan las métricas *Precision* y *Recall*, valor para el que se siguen detectando defectos periódicos del *ground truth* sin la aparición de demasiados falsos positivos. Por último está el caso de la banda E-14, único caso en que tanto la herramienta de caracterización como el sistema Parsytec obtuvieron un valor de métrica *F-Measure* de 0. Esto se debe a que el único defecto periódico presente en dicha banda está formado por un número bajo de defectos individuales. La herramienta de caracterización sólo lo puede detectar si el valor del parámetro *MinDefs* es inferior a 6, como se muestra en la figura 8.4(b). El fijar el parámetro *MinDefs* a un valor tan bajo provocaría que

un gran número de falsos positivos apareciesen en las detecciones de todas las bandas, provocando que el valor medio de la métrica F -Measure para el conjunto de bandas de entrenamiento sea menor.

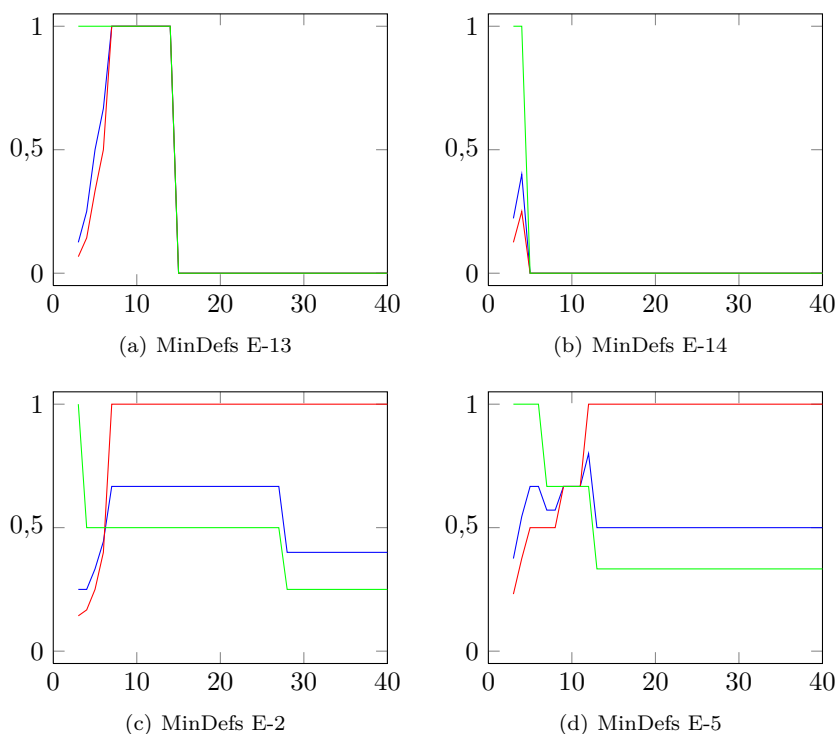


Figura 8.4: Análisis de sensibilidad de $MinDefs$ con DPB

El caso del parámetro $MaxSkips$ presenta un comportamiento distinto a los anteriores. No existe un intervalo en el que el valor de la métrica F -Measure sea siempre máximo. Fijar un valor pequeño a este parámetro hace que la configuración de la herramienta sea más restrictiva, puesto que permite menos defectos individuales no detectados en los defectos periódicos. Cuanto más alto sea el valor asignado a este parámetro, más permisiva será la configuración, y más fácil será que la herramienta de caracterización pueda detectar defectos periódicos que tengan muchos "huecos" en su *ground truth*. Del mismo modo, esta configuración permisiva facilitaría la detección de falsos positivos que no serían detectados para valores de $MaxSkips$ más bajos. En la figura 8.5 se muestran los distintos tipos de comportamientos que puede tener la métrica F -Measure ante

variaciones de este parámetro dependiendo del tipo de banda que se esté analizando. Para las bandas E-3 y E-9, representadas en las figuras 8.5(a) y 8.5(b) respectivamente, se puede ver como un valor elevado del parámetro *MaxSkips* sólo sirve para empeorar el valor de *F-Measure* al aparecer falsos positivos (el valor de *Precision* disminuye). Esto sucede para bandas que tienen defectos periódicos con pocos defectos individuales no detectados, que pueden ser detectados con valores bajos de *MaxSkips* y una densidad de defectos individuales lo suficientemente alta como para que aparezcan falsos positivos a medida que el valor de este parámetro se incrementa. Incluso, aunque la densidad de defectos individuales no sea demasiado alta, pueden aparecer falsos positivos si el valor de *MaxSkips* es lo suficientemente grande, como ocurre en la banda E-17, representada en la figura 8.5(d), donde aparece un falso positivo que tiene 58 defectos individuales no detectados consecutivamente. En cambio, para el caso de defectos periódicos con un elevado número de defectos individuales no detectados ocurre lo contrario, como se muestra en la figura 8.5(c) para la banda E-13. En este caso hasta que el valor de *MaxSkips* no es lo suficientemente alto, el defecto periódico de dicha banda no puede ser detectado. El valor óptimo para este parámetro (10), es lo suficientemente bajo como para evitar la aparición de falsos positivos en la mayoría de los casos y lo suficientemente alto como para poder detectar siempre los defectos periódicos presentes en el *ground truth*, puesto que la mayoría de los defectos periódicos generados no tienen más de 20 defectos individuales no detectados. Estos motivos hacen que establecer un valor adecuado para este parámetro sea complicado. El valor óptimo calculado supone una solución de compromiso entre estos dos problemas, permitiendo que puedan ser detectados la mayor parte de los defectos periódicos generando el mínimo número posible de falsos positivos.

Por último, quedan los dos parámetros que definen el área de búsqueda de cada defecto individual, *YRatio* y *TTol*. En el caso del parámetro *YRatio*, cuanto mayor es su valor más larga es el área de búsqueda. Puesto que el área está centrada en el punto en que debería estar el siguiente defecto individual a buscar para un determinado defecto periódico, el valor de *YRatio* no es necesario que tome valores muy grandes cuando el periodo teórico del defecto periódico se corresponde con el periodo real. Para aquellos casos en los que el periodo teórico difiere del real, es necesario un valor mayor para el parámetro *YRatio*, pero nunca es necesario que tome valores superiores al 10%. En las figuras 8.6(a) y 8.6(b), que representan la sensibilidad de este parámetro para las bandas E-1 y E-2, se puede ver como a medida que aumenta el valor del parámetro *YRatio* aumenta el valor de la métrica *Recall*, al disminuir el número de falsos negativos. Sin embargo, en la mayoría de los casos el periodo teórico está correctamente calculado y es muy parecido al periodo real. Debido a esto, el valor necesario del parámetro *YRatio* para que todos los defectos periódicos puedan ser detectados es muy pequeño, por lo que la métrica *Recall* toma un valor 1 para práctica-

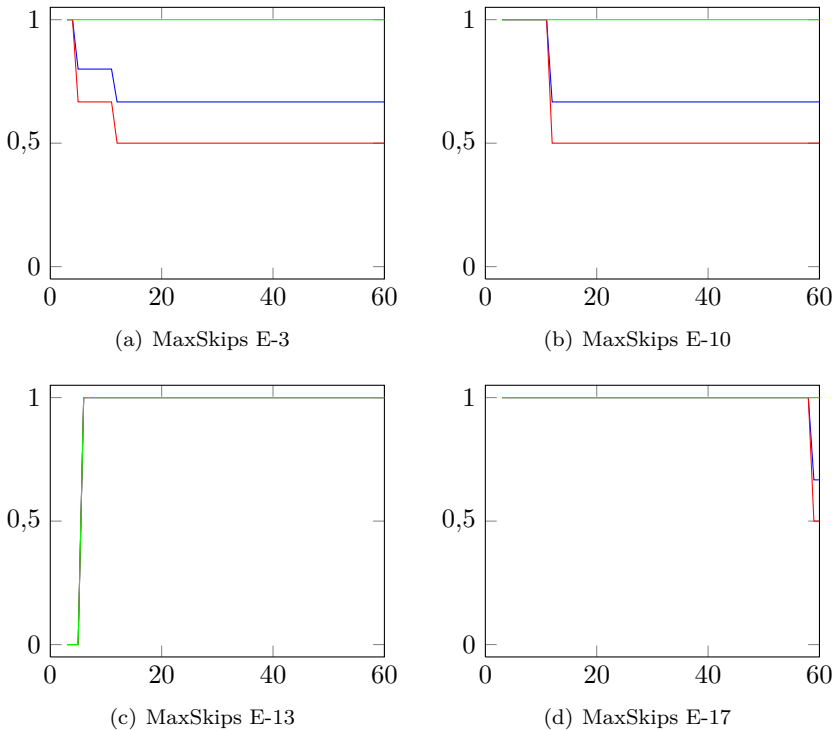


Figura 8.5: Análisis de sensibilidad de *MaxSkips* con DPB

mente todos los valores dados al parámetro *YRatio* en el análisis de sensibilidad. Esto puede observarse para las bandas E-4 y E-17 en las figuras 8.6(c) y 8.6(d) respectivamente. En cambio, la métrica *Precision* siempre presenta el mismo comportamiento, tendiendo a caer para valores grandes del parámetro *YRatio*. Un valor muy grande de este parámetro facilita la detección de falsos positivos, lo que provoca que también caiga el valor de la métrica *F-Measure*. El distinto comportamiento de las métricas *Precision* y *Recall* ante la variación de *YRatio*, provoca que la forma que suele adoptar la gráfica de la métrica *F-Measure* se asemeje a la de una función lognormal. Puesto que para este tipo de contabilización de aciertos y fallos, los defectos periódicos sólo pueden ser contabilizados como un valor 0 o un valor 1, la curva de la métrica *F-Measure* se asemeja a una función lognormal muy escalonada. Para los otros dos tipos de contabilización de aciertos y fallos por defecto periódico, las variaciones de todas las curvas son más suaves que para este caso.

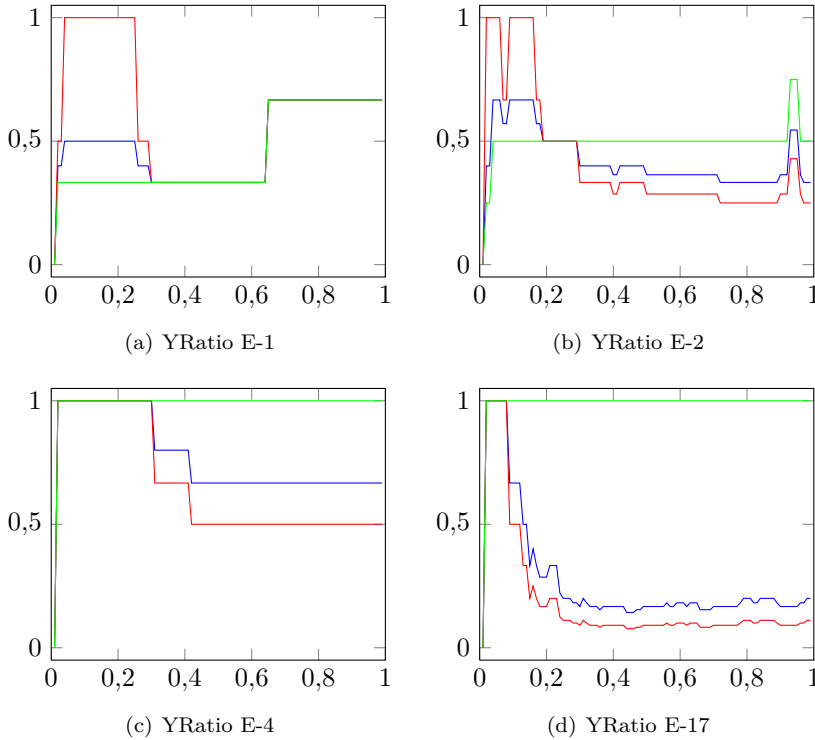


Figura 8.6: Análisis de sensibilidad de $YRatio$ con DPB

El parámetro $TTol$ presenta un comportamiento similar al $YRatio$, aunque en ocasiones influye en la métrica $F-Measure$ de forma extraña y que puede contradecir al sentido común. Las figuras 8.7(a) y 8.7(b) muestran el comportamiento normal de la métrica $F-Measure$ ante la variación del parámetro $TTol$. Esto es similar a lo que sucedía con $YRatio$, donde a medida que aumenta el valor asignado al parámetro aumenta la métrica $Recall$ mientras disminuye la métrica $Precision$. Las figuras 8.7(c) y 8.7(d) muestran dos comportamientos atípicos que se producen ocasionalmente al variar este parámetro. El primero es el caso de que la métrica $Precision$ aumente al aumentar el valor de $TTol$, cuando lo natural es que suceda lo contrario. Que el parámetro $Precision$ aumente significa que aumentando el valor de $TTol$ dejan de detectarse falsos positivos que se detectaban con valores de $TTol$ más pequeños. Esto puede parecer extraño, puesto que si con un determinado valor asignado al parámetro $TTol$ se detecta un falso positivo, aumentando el valor de $TTol$ se debería seguir detec-

tando, puesto que estamos realizando la búsqueda con una configuración más permisiva. Esto ocurre cuando los falsos positivos están situados cerca de los defectos periódicos reales que aparecen en el *ground truth*. Al hacer muy grande la tolerancia transversal, algunos de los defectos individuales que formaban este defecto periódico pueden ser incorporados al defecto periódico real (cuando los defectos individuales de éste no fueron detectados), lo que provoca que el falso positivo pueda no tener el suficiente número de defectos individuales como para formar parte de la solución.

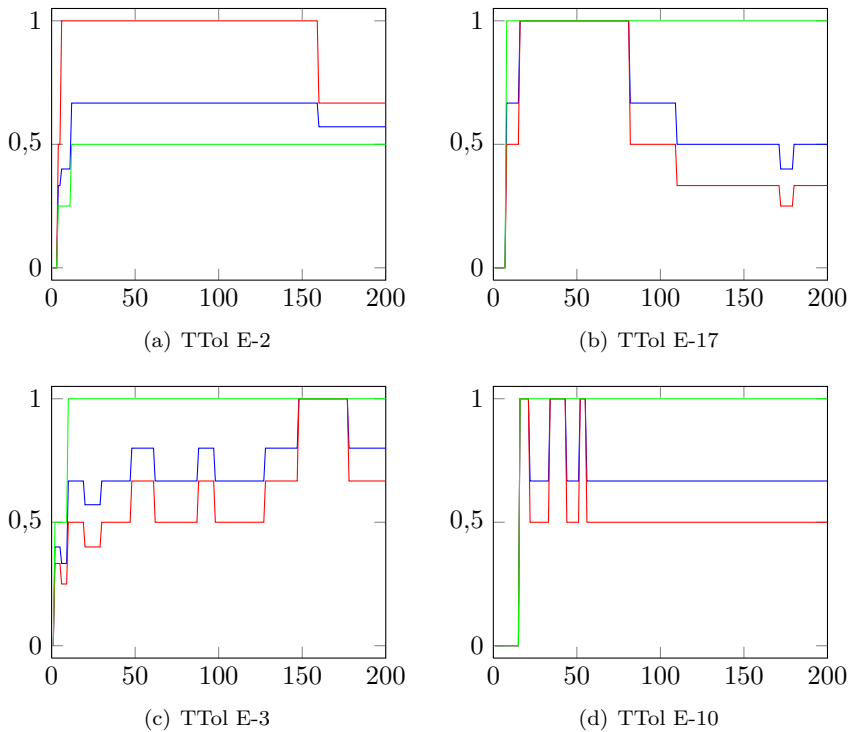
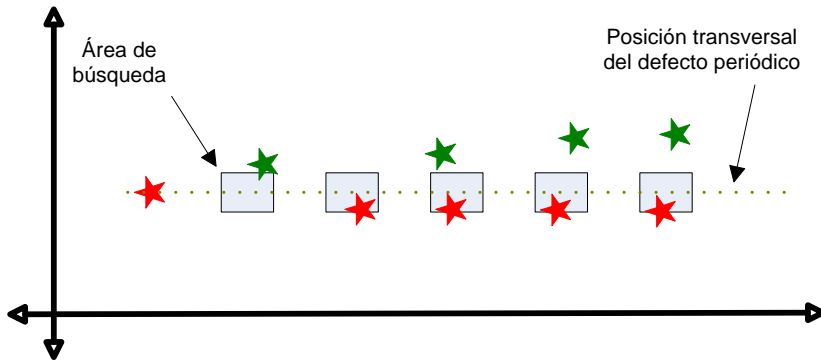


Figura 8.7: Análisis de sensibilidad de $TTol$ con DPB

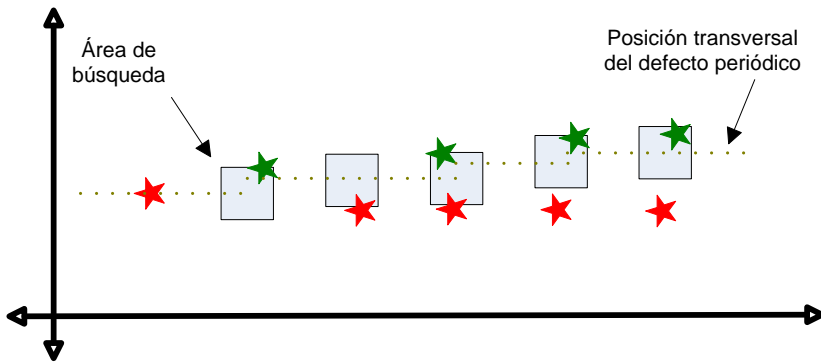
El otro comportamiento atípico es el mostrado por la banda E-10 en la figura 8.7(d), donde la métrica *Precision* aumenta y disminuye varias veces al variar el valor del parámetro $TTol$. El motivo de que esto suceda es similar al del caso anterior, y es que dependiendo de la anchura del área de búsqueda, pueden ser incluidos en un defecto periódico defectos que forman parte de un falso positivo. A esto hay que añadir el hecho de que el valor de la posición transversal del

defecto periódico se va actualizando cada vez que se añade un nuevo defecto individual, lo cual a su vez influye en la posición del área de búsqueda. En la figura 8.8 se ilustra el motivo por lo que se produce esta variación en la métrica *F-Measure*. La figura 8.8(a) muestra una búsqueda de defecto periódico con un valor de *TTol* pequeño. En la figura 8.8(b) el valor de *TTol* es un poco mayor, y en la figura 8.8(c) el valor de *TTol* es el mayor de todos. En los tres casos, las estrellas de color rojo representan defectos individuales que aparecen dentro del defecto periódico a detectar en el *ground truth* mientras que las estrellas de color verde representan defectos individuales que no pertenecen al defecto periódico. Cuando el valor de *TTol* toma el valor más pequeño, el área de búsqueda no es lo suficientemente ancha como para considerar el primer defecto individual de naturaleza no periódica como parte de él (aprovechando que precisamente en ese lugar no fue detectado por el sistema de visión por computador el defecto individual que realmente debería incluirse en el defecto periódico). Sin embargo, si se aumenta ligeramente el valor del parámetro *TTol*, éste defecto individual sí es encontrado por el algoritmo de la herramienta de caracterización. Como sucede siempre que se incluye un nuevo defecto individual al defecto periódico, las características de éste son actualizadas, incluyendo la posición transversal promedio del defecto. En este caso concreto, la posición transversal se desplaza hacia la parte superior de la figura, lo que provoca que el siguiente defecto encontrado sea otro defecto que no pertenece al defecto periódico en el *ground truth* (cuando en este caso sí fue detectado por el sistema de visión por computador), alejando más aun la posición transversal del defecto y la posición del área de búsqueda del siguiente defecto individual de la posición correcta. Este desplazamiento de la posición transversal promedio del defecto periódico provoca que defectos individuales que deberían pertenecer al defecto periódico no se encuentren, y que otros que no deberían pertenecer a él sean encontrados en su lugar. Sin embargo, si el valor del parámetro *TTol* se incrementa más, la detección puede volver al cauce normal. Aunque el defecto de naturaleza no periódica sea igualmente detectado al aumentar la anchura del área de búsqueda y aunque la posición transversal del defecto periódico se haya desplazado, el área de búsqueda es ahora lo suficientemente grande como para encontrar el siguiente defecto individual del defecto periódico, lo cual provoca a su vez que la posición transversal promedio se recalculé y vuelva a acercarse al valor real de la posición transversal del defecto periódico.

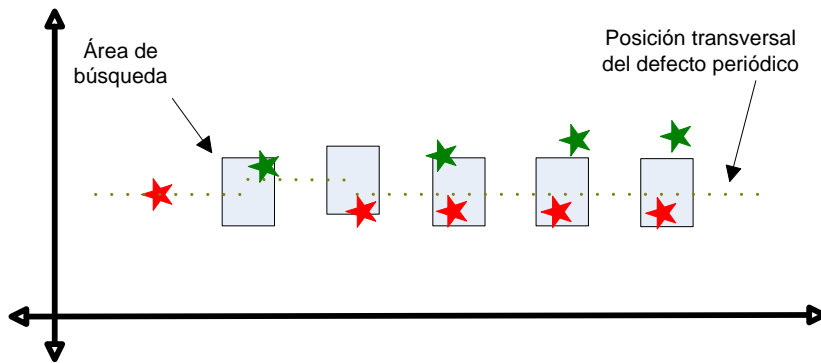
Estos dos comportamientos atípicos hacen que la métrica *F-Measure* sea muy sensible ante variaciones del parámetro *TTol* en algunos casos concretos. Aún así, esto no es un problema grave, ya que no afecta muy negativamente a la calidad de las detecciones realizadas por la herramienta de caracterización. Aunque el valor de la métrica *F-Measure* varíe de forma atípica ante estas situaciones, siempre es una variación que hace aumentar su valor, aunque dicho aumento no sea debido a una mejor calidad de la detección, sino a que la inclusión incorrecta



(a)



(b)



(c)

Figura 8.8: Comportamiento atípico ante variaciones del parámetro TTol

de varios defectos individuales en un defecto periódico es contabilizada como un acierto. Puesto que el método de contabilización de aciertos y fallos binario que se analiza en esta sección no tiene en cuenta los defectos individuales que integran cada defecto periódico detectado, el hecho de incluir defectos individuales que no forman parte de un defecto periódico en el *ground truth* no afecta negativamente en el valor de la métrica *F-Measure*. Por este motivo, estos comportamientos atípicos son prácticamente inexistentes y de menor gravedad para los métodos de contabilización híbrida y real, como se verá a continuación.

8.1.2. Contabilización por defecto periódico híbrida (DPH)

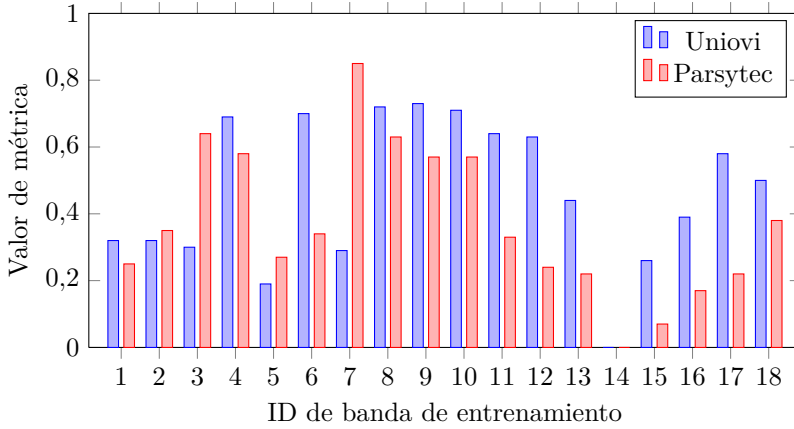
Las configuraciones óptimas obtenidas utilizando este método de contabilización son las mostradas en la tabla 8.2.

Tabla 8.2: Configuración de parámetros óptima para DPH

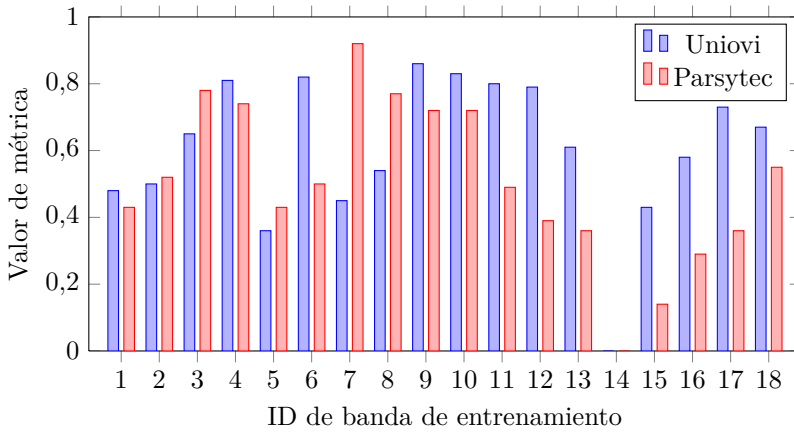
| Parámetro | Jaccard | F-Measure |
|-----------|---------|-----------|
| MinDefs | 18 | 18 |
| MaxSkips | 20 | 20 |
| ARatio | 100 | 100 |
| WidRatio | 100 | 100 |
| LenRatio | 100 | 100 |
| TTol | 44 | 56 |
| YRatio | 9 | 7 |

En las gráficas mostradas en la figura 8.9 se comparan las soluciones proporcionadas por el sistema Parsytec y la herramienta desarrollada utilizando la configuración óptima para las métricas de *Jaccard*, figura 8.9(a), y *F-Measure*, figura 8.9(b).

Utilizando este método de contabilización se pueden ver mejor las diferencias entre la herramienta de caracterización y el sistema Parsytec. Puesto que la mayoría de los defectos periódicos son detectados por ambos, la contabilización binaria no sirve para poder determinar qué detección es mejor. En este caso, puesto que los defectos periódicos ciertos positivos son calificados teniendo en cuenta los defectos individuales que los componen, un valor mayor de la métrica significa que, además de haber detectado correctamente el defecto periódico, éste es más parecido al definido en el *ground truth*. La diferencia más reseñable entre la configuración óptima obtenida para este tipo de contabilización y la obtenida para la contabilización binaria es el valor del parámetro *MinDefs*. En el caso anterior, éste valor era bajo, para permitir que todos los defectos periódicos fueran



(a) Jaccard



(b) F-Measure

Figura 8.9: Comparativa utilizando contabilización DPH

detectados, incluso los más pequeños. Con la contabilización híbrida, además de tener que detectar el mayor número de defectos periódicos, es necesario que los defectos defectos periódicos detectados estén mejor caracterizados, es decir, que deben contener los defectos individuales que realmente lo constituyen. De este modo, todos los parámetros son más permisivos. Así, es posible detectar el mayor número de defectos individuales que integran cada defecto periódico en el *ground truth*, pero para evitar la aparición de falsos positivos, el valor del

parámetro *MinDefs* debe ser mayor. Según lo comentado en la subsección 8.1.1, sólo tres bandas habían presentado falsos positivos, la E-3, la E-7 y la E-10. En este caso, el falso positivo detectado en la banda E-10 desaparece, al no poseer un número de defectos individuales suficiente como para satisfacer la condición impuesta por el parámetro *MinDefs*. Esto se resume en que la herramienta de caracterización ha obtenido mejores resultados que el sistema Parsytec en 13 de las 18 bandas para la métrica de *Jaccard* y en 12 para *F-Measure*. En todos los casos en los que el sistema Parsytec ha obtenido mejores resultados, esto se ha producido por la detección de defectos periódicos pequeños por parte del sistema Parsytec que han quedado sin detectar por la herramienta de caracterización. La configuración óptima determinada para este método de contabilización favorece la detección de los defectos periódicos de forma más completa, de tal modo que los defectos periódicos más graves, son detectados prácticamente de forma íntegra por la herramienta de caracterización (a diferencia del sistema Parsytec, que los detecta incompletos). Por este motivo, los resultados del sistema Parsytec son superiores en bandas con varios defectos periódicos de los cuales alguno es muy pequeño, y los resultados de la herramienta de caracterización son superiores en las bandas que sólo tienen defectos periódicos de tamaño medio o grande. El promedio de las métricas de *Jaccard* para todo el conjunto de bandas de entrenamiento para la herramienta de caracterización y el sistema Parsytec es 0,47 y 0,37 respectivamente. Utilizando la métrica *FMeasure*, los valores promedios son de 0,61 para la herramienta de caracterización y 0,52 para el sistema Parsytec. Estos resultados están representados gráficamente en la figura 8.10.

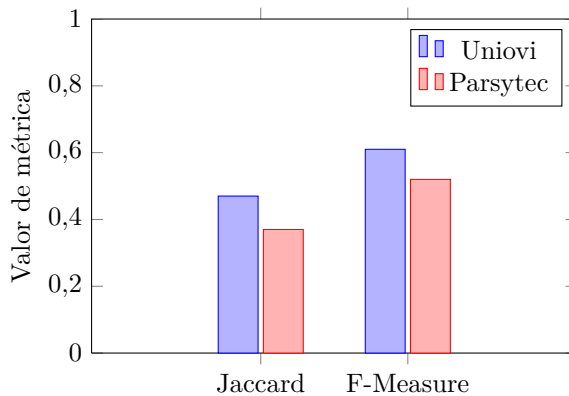


Figura 8.10: Resultados obtenidos para el método DPH

Los análisis de sensibilidad de parámetros realizados para este tipo de contabilización ofrecen unos resultados similares a los presentados para la contabiliza-

ción binaria. En general, la influencia sobre las métricas de *Jaccard* y *F-Measure* de las variaciones de los valores de parámetros es muy similar. La diferencia más relevante es que en este caso, como los valores de métrica asignados a los defectos periódicos ciertos positivos pueden variar según los defectos que lo integran en lugar de pasar de 0 a 1 (o al revés) a partir de un determinado valor, las gráficas obtenidas son menos escalonadas. Los parámetros morfológicos, igual que ocurría con la contabilización binaria, ofrecen siempre los mejores resultados para valores grandes, con lo cual a efectos prácticos pueden ser ignorados. En todos los casos, la variación sufrida por las métricas de *Jaccard* y *F-Measure* ante la variación de los parámetros morfológicos es idéntica a la mostrada en la figura 8.3 para la contabilización binaria.

El parámetro *MinDefs* presenta una influencia idéntica sobre las métricas de *Jaccard* y *F-Measure* a la contabilización binaria. El caso normal sigue siendo que los valores de estas métricas dibujen una meseta, como la mostrada en la figura 8.11(a) para la métrica *F-Measure* en la banda E-15. Del mismo modo, cuando existen defectos periódicos muy grandes, el valor necesario que hay que asignar al parámetro *MinDefs* es muy grande (mayor que el mayor valor utilizado en estos análisis de sensibilidad) para que los valores de estas métricas caigan a 0, como se muestra en la figura 8.11(b) para la métrica *F-Measure* en la banda E-18.

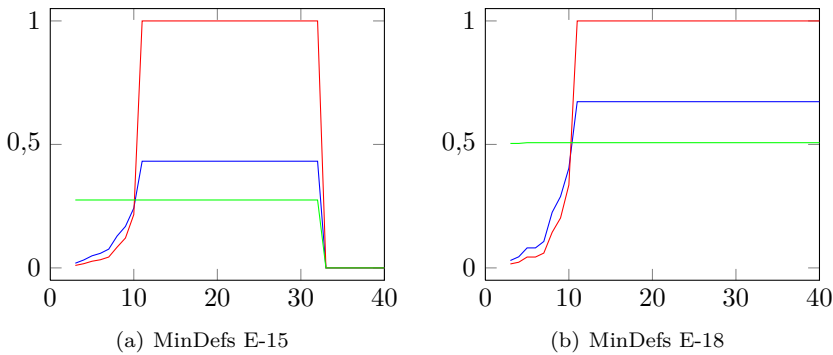


Figura 8.11: Análisis de sensibilidad de *MinDefs* con DPH

En el caso del parámetro *MaxSkips*, en esencia presenta un comportamiento similar a la contabilización binaria, pero los valores de las métricas estudiadas sufren cambios menos bruscos, ya que pequeños cambios en los valores de este parámetro producen pequeños cambios en las métricas y no como sucede con la contabilización binaria que se producen cambios bruscos cuando se pasa de no detectar un defecto periódico a detectarlo (o viceversa). En las figuras 8.12(a) y

8.12(b) se puede ver como la métrica F -Measure se incrementa a medida que el valor del parámetro $MaxSkips$ es mayor. Puesto que un valor más alto de este parámetro implica una configuración más permisiva, más defectos individuales pertenecientes a los defectos periódicos pueden ser detectados, lo que hace subir el valor de la métrica $Recall$, y consecuentemente el valor de la métrica F -Measure. Hay que tener en cuenta, que cuando el valor de dicho parámetro es muy bajo, puede ser lo bastante restrictivo como para que no puedan ser detectados los defectos periódicos presentes en la banda. En la figura 8.12(b) se aprecia la ocurrencia de este fenómeno en la banda E-12, igual que sucedía con la banda E-13 para la contabilización binaria, representado en la figura 8.5(c).

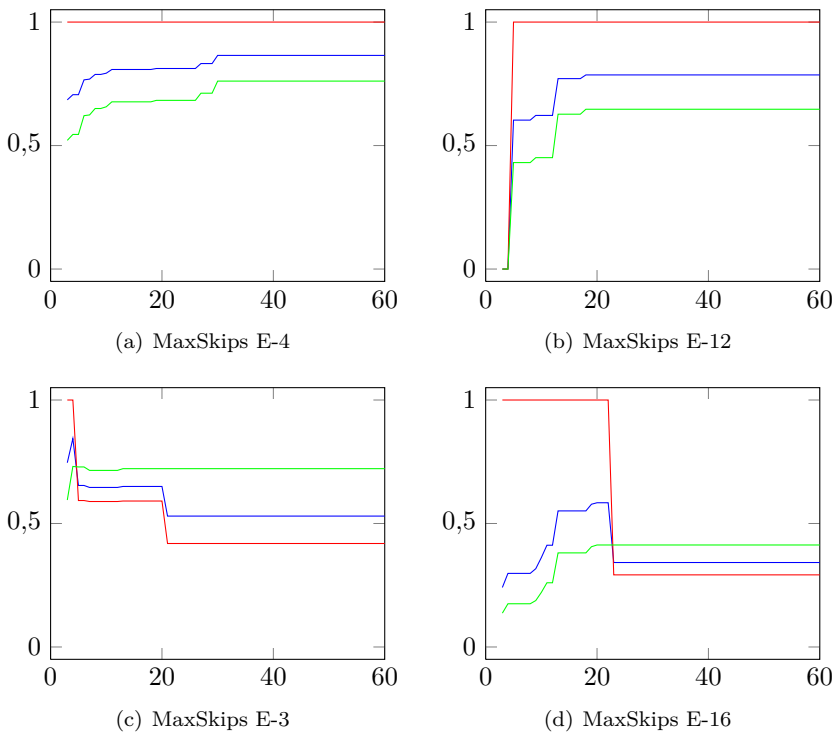


Figura 8.12: Análisis de sensibilidad de $MaxSkips$ con DPH

Comparando ambas gráficas, se puede ver que aunque la tendencia de las métricas es similar, en el caso de la contabilización binaria el cambio es brusco y en la contabilización híbrida es más paulatino. También puede suceder que ambas tendencias se produzcan para la misma banda, como ocurre con el caso

de la banda E-16. Para valores bajos del parámetro *MaxSkips*, a medida que éste se incrementa el valor de la métrica *F-Measure* aumenta, al detectar un mayor número de defectos individuales en los defectos periódicos. Sin embargo, a partir de un valor de 23, se comienzan a detectar falsos positivos, con lo que las métricas *Precision* y *F-Measure* caen. Este comportamiento, se produce en las bandas que tienen defectos periódicos cuyos defectos individuales están poco definidos (lo que provoca que haya muchos "huecos" en el defecto) y que necesitan un valor de *MaxSkips* grande para poder ser detectados y simultáneamente existe una densidad elevada de defectos individuales, lo que provoca la aparición de falsos positivos cuando la configuración de parámetros es lo suficientemente permisiva.

El parámetro *YRatio* con este tipo de contabilización hace que la gráfica de la métrica *F-Measure*, ante cambios de su valor, presente en la mayoría de los casos una curva similar a una función lognormal, como sucede con la banda E-7, representada en la figura 8.13(a). Este comportamiento sucede para las bandas que necesitan un valor bajo del parámetro *YRatio* para detectar los defectos periódicos, pero tienen una densidad de defectos superficiales elevada, lo que provoca la aparición de falsos positivos cuando el valor asignado a este parámetro es elevado. Sin embargo, para las bandas que tienen un bajo número de defectos individuales, en ocasiones no son detectados falsos positivos cuando el valor de *YRatio* es grande, o sólo son detectados cuando dicho valor es extremo. Esto sucede, por ejemplo, para la banda E-6, representada en la figura 8.13(b). El valor de las métricas permanece estable y no disminuye aunque se establezcan valores elevados de *YRatio*. En algunas bandas, aunque las métricas permanezcan estables, como en este caso, caen a valores bajos cuando, ante valores extremos de *YRatio* (superiores al 80 %) aparecen falsos positivos. Puesto que el valor óptimo de este parámetro está muy lejano a estos valores extremos, este problema no ocurrirá nunca cuando la herramienta de caracterización esté funcionando en una planta industrial.

Nuevamente, la influencia del parámetro *TTol* en las métricas de *Jaccard* y *F-Measure* son similares a la contabilización binaria, aunque todas las variaciones de estas métricas son más suaves que para aquélla. El comportamiento típico, presente en la mayoría de las bandas de entrenamiento, es el mostrado en la figura 8.14(a) para la banda E-9. El valor de *F-Measure* va aumentando a medida que la configuración es más permisiva (valores más altos de *TTol*), hasta que llega un punto en el que al ser muy ancha el área de búsqueda aparecen falsos positivos, lo que hace que disminuya la métrica *Precision*. Sin embargo, también puede producirse el caso de que no aparezcan falsos positivos al aumentar el ancho del espacio de búsqueda cuando la banda no tiene un número grande de defectos individuales. Esto sucede en la banda E-4, representada en la figura 8.14(b). Esta banda tiene tres defectos periódicos. Dos de ellos son detectados para valores bajos del parámetro *TTol* (valores inferiores a 25). Se puede ver como, para el intervalo de valores 10 – 25, la métrica *Recall* va aumentando, al

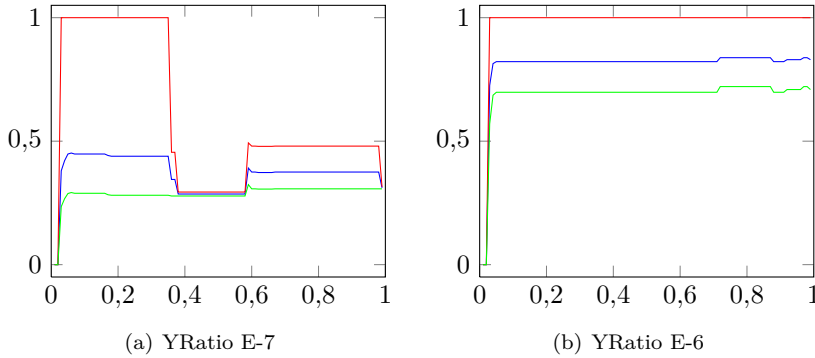


Figura 8.13: Análisis de sensibilidad de $YRatio$ con DPH

ir encontrando cada vez un mayor número de defectos individuales en esos dos defectos periódicos. Para valores superiores a 25, es detectado el otro defecto periódico existente en el *ground truth* para esta banda, con lo que el valor de la métrica *Recall* aumenta en gran medida. A partir de este valor, la métrica *Recall* sigue aumentando, pero mucho menos, ya que dichos aumentos se deben al hecho de encontrar más defectos individuales de los defectos periódicos. Igual que en el caso de la contabilización binaria, los parámetros que establecen las dimensiones del área de búsqueda son los más críticos, y pequeñas variaciones en ellos pueden provocar grandes cambios en las métricas.

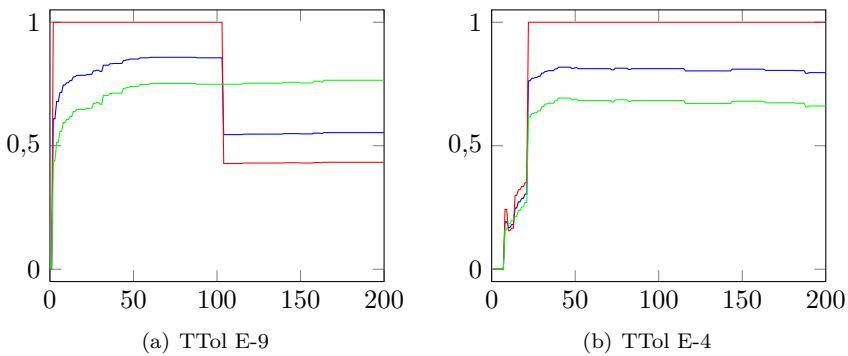


Figura 8.14: Análisis de sensibilidad de $TTol$ con DPH

En el caso de esta última banda, se puede ver que a partir del valor 25 del parámetro $TTol$ aumenta en gran medida la métrica *Recall* por haber detectado

un defecto periódico grande, pero también aumenta en gran medida la métrica *Precision*. Esto significa que un falso positivo ha desaparecido. Parece extraño que al establecer una configuración más permisiva desaparezcan falsos positivos, cuando lo habitual es que éstos aparezcan cuando la configuración de parámetros es permisiva. Este comportamiento sucede porque, debido a las pequeñas dimensiones del área de búsqueda, un defecto periódico no es detectado de forma completa, es decir, sólo son detectados unos pocos de los defectos individuales que lo componen. Este hecho puede provocar que la posición transversal media del defecto detectado diste de la posición transversal global que aparece en el *ground truth*, y la herramienta de caracterización entienda que se trata de defectos diferentes (cuando realmente es el mismo, pero incompleto). Este problema, aunque en menor medida, también existe para el parámetro que fija la longitud del área de búsqueda, *YRatio*. Afortunadamente, es un problema que no afectará al uso de la herramienta cuando esta esté en planta. Aunque los defectos que ésta detecte no sean completos (y su posición transversal promedio diste de la real), seguirá dando un aviso válido a los trabajadores de la planta de que se está produciendo un defecto periódico, aunque la posición transversal proporcionada diste ligeramente de la real.

8.1.3. Contabilización por defecto periódico real (DPR)

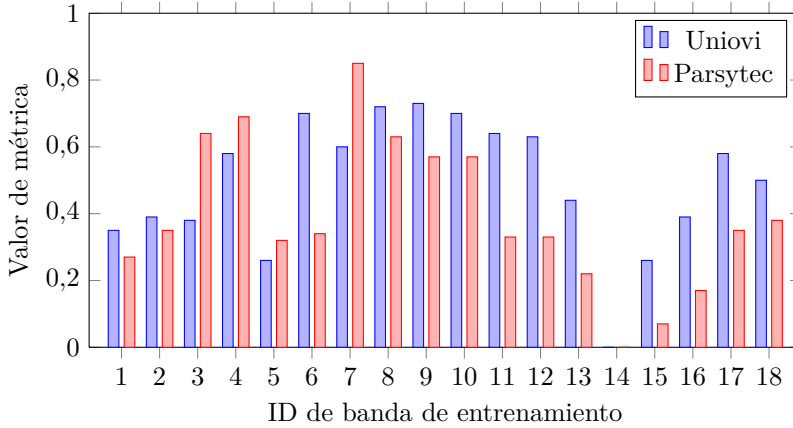
Las configuraciones óptimas obtenidas utilizando este método de contabilización son las mostradas en la tabla 8.3. Puesto que el método de contabilización real es muy similar al híbrido, la configuración óptima obtenida es prácticamente la misma. La única diferencia reside en que, para la métrica de *Jaccard*, el valor óptimo del parámetro *YRatio* es 9, mientras que para este método de contabilización es 7, igual que para la métrica *F-Measure*.

Tabla 8.3: Configuración de parámetros óptima para DPR

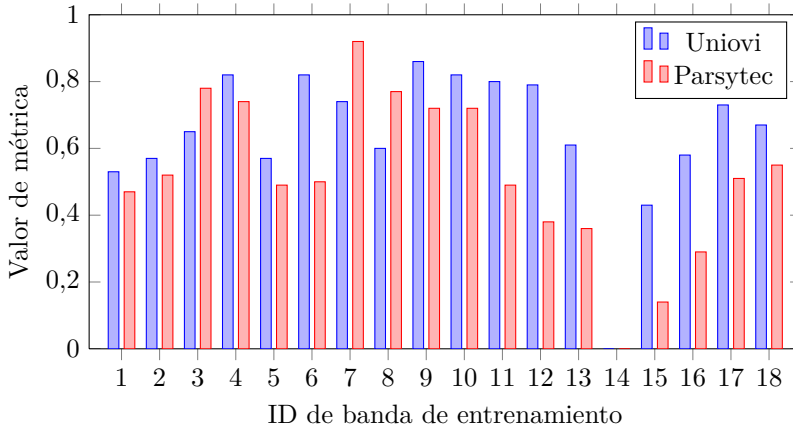
| Parámetro | Jaccard | F-Measure |
|-----------|---------|-----------|
| MinDefs | 18 | 18 |
| MaxSkips | 20 | 20 |
| ARatio | 100 | 100 |
| WidRatio | 100 | 100 |
| LenRatio | 100 | 100 |
| TTol | 44 | 56 |
| YRatio | 7 | 7 |

En las gráficas mostradas en la figura 8.15 se comparan las soluciones propor-

cionadas por la herramienta desarrollada y el sistema Parsytec utilizando la configuración óptima para las métricas de *Jaccard*, figura 8.15(a), y *F-Measure*, figura 8.15(b).



(a) Jaccard



(b) F-Measure

Figura 8.15: Comparativa utilizando contabilización DPR

Las configuraciones óptimas obtenidas para los métodos DPH y DPR son prácticamente idénticas, pese a que las caracterizaciones obtenidas en cada caso hayan sido valoradas de diferente forma, al utilizar métodos de contabilización distintos. Concretamente, para la métrica *F-Measure*, la configuración óptima

determinada es la misma que la obtenida para la contabilización híbrida, por lo que las detecciones de defectos periódicos para el conjunto de bandas de *test* es idéntico. En el caso de *Jaccard*, la configuración sólo difiere ligeramente en el parámetro *YRatio*, de modo que sólo se producen algunas diferencias poco significativas en las detecciones de algunas de las bandas. El promedio de las métricas de *Jaccard* para todo el conjunto de bandas de entrenamiento para la herramienta de caracterización y el sistema Parsytec es 0,49 y 0,39 respectivamente. Utilizando la métrica *F-Measure*, los valores promedios son de 0,64 para la herramienta de caracterización y 0,52 para el sistema Parsytec. Estos resultados están representados gráficamente en la figura 8.16.

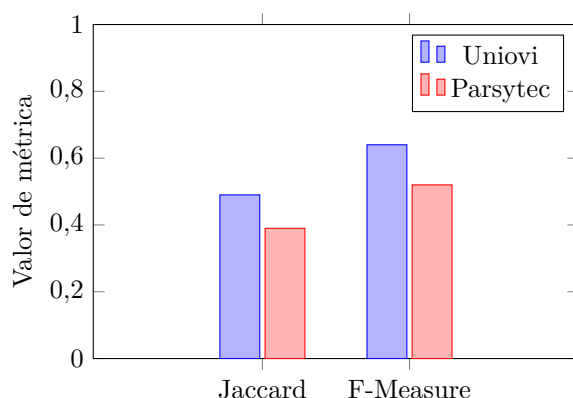


Figura 8.16: Resultados obtenidos para el método DPR

Respecto a los análisis de sensibilidad, son todos prácticamente idénticos a los obtenidos para la contabilización híbrida. Puesto que utilizando la configuración óptima que ha sido determinada para la contabilización DPR prácticamente no aparecen defectos periódicos falsos positivos, la diferencia entre los métodos DPH y DPR reside en la contabilización de falsos negativos. Por este motivo, los cambios sólo se notan en la métrica *Recall*, como se puede ver en la figura 8.17. Para el método de contabilización híbrido, todos los falsos negativos suman una unidad a la cuenta de defectos periódicos falsos negativos de la detección. Para el método real, éstos sólo sumarán una unidad cuando sean muy grandes (más de 100 defectos individuales), mientras que los defectos periódicos más pequeños (los que han quedado sin detectar utilizando la configuración óptima de la tabla 8.3) sólo suman entre 0,2 y 0,3 a dicha cuenta. De este modo, el valor de la cuenta FN (número de defectos falsos negativos) es siempre menor para la contabilización real, por lo que las métricas *Recall* y *F-Measure* son siempre más altas.

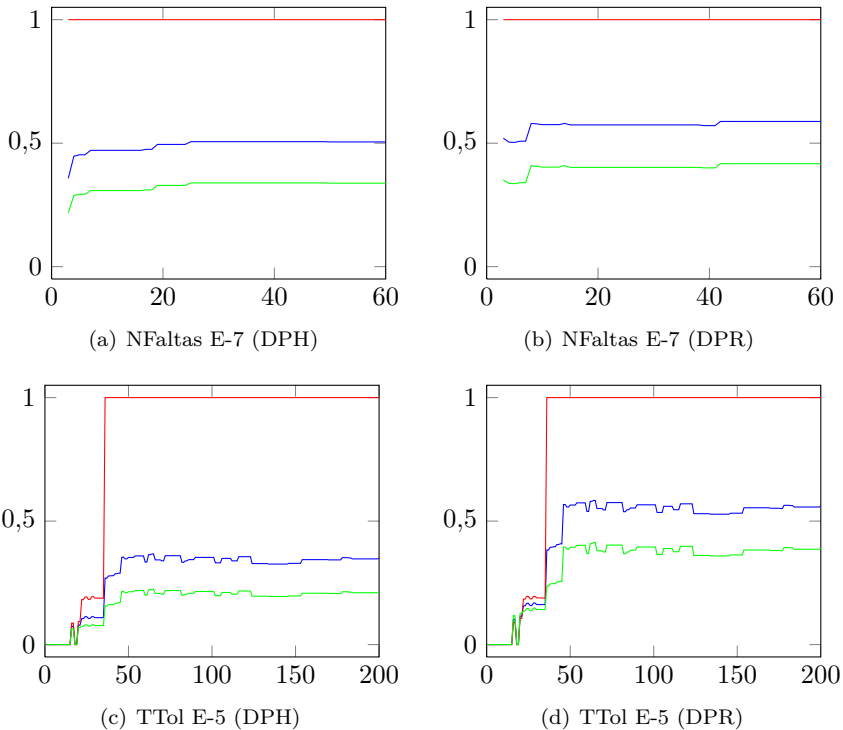


Figura 8.17: Comparativa entre DPH y DPR

8.1.4. Contabilización por defecto individual (DI)

Para este método de contabilización se ha obtenido la misma configuración óptima de parámetros para las métricas de *Jaccard* y *F-Measure*. Dicha configuración se muestra en la tabla 8.4.

Se aprecia claramente una configuración mucho más permisiva que en los casos anteriores. Esto es debido a que utilizando este método de contabilización, el objetivo último de la herramienta de caracterización es encontrar el mayor número de defectos individuales posible. Utilizando contabilizaciones por defecto periódico, generar un falso positivo (detectar un defecto periódico inexistente) pesaba muy negativamente en la métrica. Con éste, encontrar un falso positivo (añadir un defecto individual de naturaleza no periódica a un defecto periódico) hace disminuir las métricas mucho menos.

En la gráfica de barras mostrada en la figura 8.18 se comparan las soluciones proporcionadas por la herramienta desarrollada y el sistema Parsytec utilizando

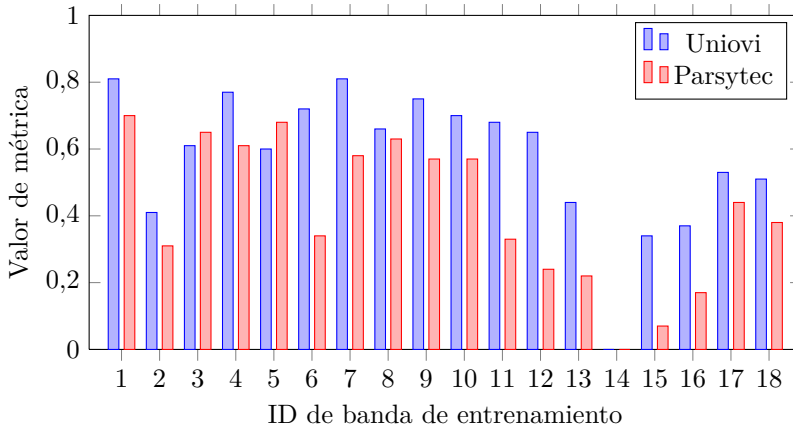
Tabla 8.4: Configuración de parámetros óptima para DI

| Parámetro | Jaccard y F-Measure |
|-----------|---------------------|
| MinDefs | 18 |
| MaxSkips | 32 |
| ARatio | 100 |
| WidRatio | 100 |
| LenRatio | 100 |
| TTol | 64 |
| YRatio | 7 |

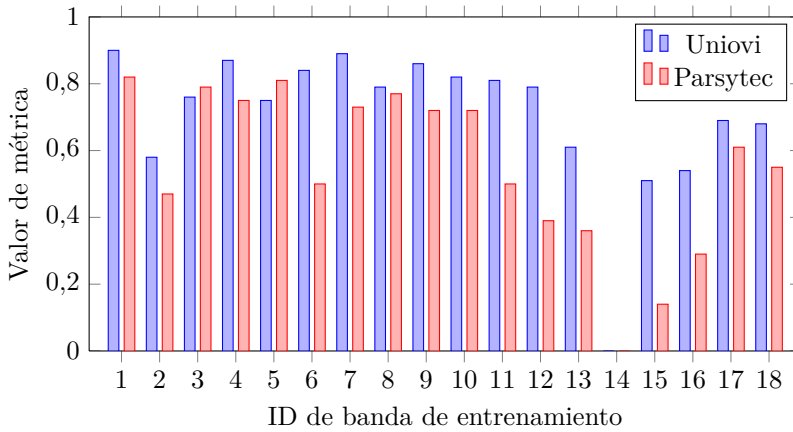
esta configuración.

En este caso, los resultados obtenidos por la herramienta de caracterización son muy superiores a los obtenidos por el sistema Parsytec. Esto se debe a que, para la mayoría de los defectos periódicos existentes en el *ground truth*, éstos han sido detectados de manera casi íntegra, incluyendo prácticamente todos los defectos individuales que los componen en el *ground truth*. Por el contrario, para poder lograr este objetivo, se detectan en varias bandas defectos periódicos no existentes en el *ground truth*, varios de ellos con pocos defectos individuales. Aún así, los valores de *Jaccard* y *F-Measure* siguen siendo elevados puesto que detectar un defecto periódico falso positivo con 20 defectos individuales pesa negativamente del mismo modo que no encontrar ningún defecto periódico falso positivo, pero que 20 defectos individuales de naturaleza no periódica sean añadidos a un defecto periódico existente en el *ground truth*. El promedio de las métricas de *Jaccard* para todo el conjunto de bandas de entrenamiento para la herramienta de caracterización y el sistema Parsytec es 0,58 y 0,42 respectivamente. Utilizando la métrica *F-Measure*, los valores promedios son de 0,70 para la herramienta de caracterización y 0,55 para el sistema Parsytec. Estos resultados están representados gráficamente en la figura 8.19.

En la figura 8.20 se muestran las detecciones realizadas tanto por la herramienta de caracterización como por el sistema Parsytec para la banda E-5 del conjunto de bandas de entrenamiento utilizando la contabilización por defecto individual. Por razones de espacio sólo se muestran los primeros 120 metros de la banda, donde se aprecian tres defectos periódicos. Las líneas azules discontinuas muestran la posición transversal promedio de cada uno de estos defectos periódicos. Sobre cada defecto individual que aparece en el *ground truth* como perteneciente a un defecto periódico está dibujado un triángulo negro. Los defectos individuales que están pintados en rojo son aquéllos que han sido inte-



(a) Jaccard



(b) F-Measure

Figura 8.18: Comparativa utilizando contabilización DI

grados en los correspondientes defectos periódicos. Se puede observar como la herramienta de caracterización sólo ha conseguido detectar el defecto periódico más grande, ya que el número de defectos individuales que forman los otros dos defectos periódicos es inferior al valor del parámetro *MinDefcs*, 18, utilizado con este método de contabilización. Pese a que de los tres defectos periódicos presentes en el *ground truth* la herramienta de caracterización sólo ha encontrado uno, el valor de la métrica *F-Measure* es sólo ligeramente inferior al obtenido por

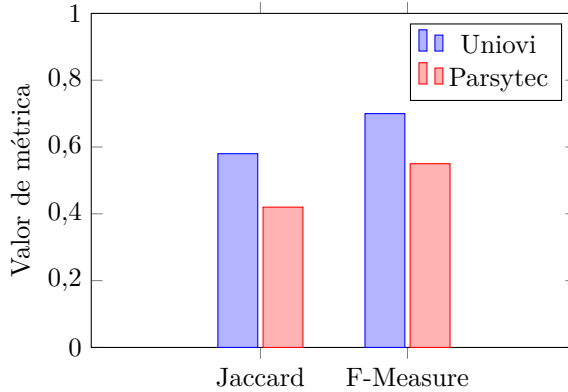
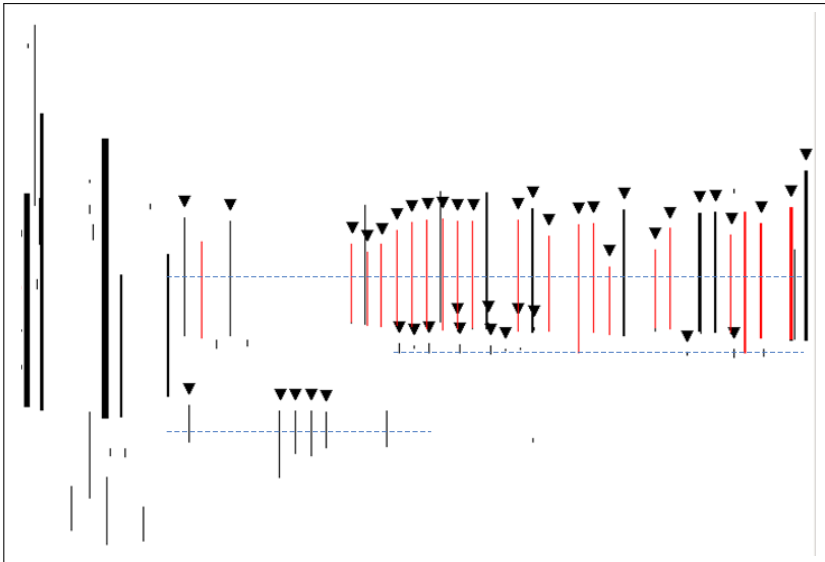


Figura 8.19: Resultados obtenidos para el método DI

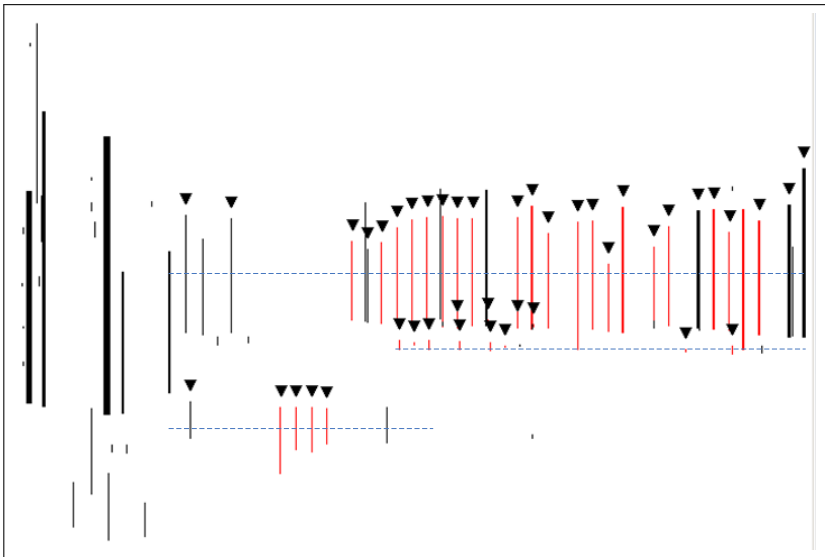
el sistema Parsytec (0,75 frente a 0,81), debido a que el defecto periódico que sí ha sido detectado está mucho más completo que el detectado por el sistema Parsytec y a que los defectos periódicos no detectados, al ser muy pequeños, tienen una influencia poco negativa en las métricas.

Los análisis de sensibilidad realizados para este método de contabilización ofrecen resultados muy parecidos a los métodos de contabilización por defecto periódico. Los únicos parámetros que muestran diferencias significativas son *MinDefs* y *TTol*. En el caso de *MinDefs*, el gráfico que traza la métrica *F-Measure* ante variaciones de dicho parámetro tiene forma de meseta, como ocurría para el resto de métodos de contabilización. Cuando el valor de *MinDefs* es mayor que el número de defectos individuales que integran un defecto periódico, la métrica *F-Measure* cae a cero, al no poder ser detectado dicho defecto periódico por la herramienta de caracterización. Sin embargo, puesto que el valor del parámetro *MaxSkips* es mayor en la configuración óptima determinada para este método de contabilización, pueden ser detectadas secciones del defecto periódico que antes no era posible detectar, al haber muchos defectos individuales no detectados entre una sección previamente no detectada y el resto del defecto periódico. Aunque en la mayoría de los casos el valor del parámetro *MinDefs* a partir del cual los defectos periódicos de cada banda dejan de detectarse son los mismos, en ocasiones este valor sí cambia, como se observa en la figura 8.21.

La tendencia genérica del parámetro *TTol* en los métodos de contabilización por defecto periódico era de crecimiento para valores bajos seguido de un intervalo de estabilización (para el cual el valor de la métrica *F-Measure* apenas cambia ante variaciones de dicho parámetro). En ocasiones, cuando el valor asignado al parámetro *TTol* es muy grande, la métrica *F-Measure* puede caer al aparecer



(a) Herramienta de caracterización



(b) Sistema Parsytec

Figura 8.20: Detecciones de la herramienta de caracterización y de Parsytec

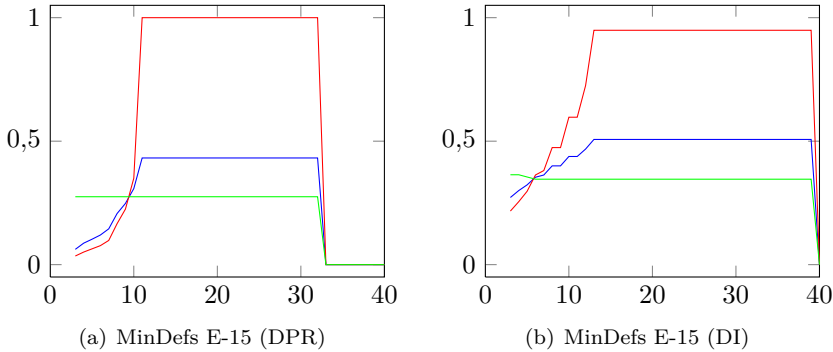


Figura 8.21: Análisis de sensibilidad de *MinDefs* con DPR y DI

falsos negativos, falsos positivos o ambos. Para este método de contabilización el comportamiento es similar, aunque las caídas de la métrica *F-Measure* se producen para valores mayores del parámetro y son caídas más pequeñas. Las figuras 8.22(a) y 8.22(b) muestran las diferencias en la evolución de las métricas *Precision*, *Recall* y *M-Feasure* ante modificaciones del parámetro *TTol* para los métodos de contabilización DPR y DI. Utilizando DPR, cuando el valor de *TTol* es superior a 96 la métrica *Recall* cae, al aparecer un falso negativo (un defecto periódico deja de detectarse debido a un comportamiento atípico ya comentado y representado en la figura 8.8). Para el método de contabilización DI, el dejar de detectar un defecto periódico sólo tendría un gran peso (negativamente) si éste defecto fuese grande. Aún así, para este caso particular, el falso negativo no aparece en la solución obtenida con la configuración óptima del método DI, ya que este comportamiento atípico del parámetro *TTol* es muy dependiente del conjunto de defectos individuales incluidos previamente en el defecto periódico. En las figuras 8.22(c) y 8.22(d) se aprecia el otro fenómeno que puede hacer caer la métrica *F-Measure*: la aparición de un falso positivo para valores de *TTol* muy grandes. En el caso de utilizar el método de contabilización DPR, cuando el valor de *TTol* es suficientemente grande y si la banda presenta un elevado número de defectos individuales, es detectado un defecto periódico falso positivo, lo que hace caer la métrica *Precision*. Para el método de contabilización DI ocurre lo mismo, sólo que el falso positivo tiene una influencia negativa muy inferior, por lo que la métrica *Precision* (y por tanto la métrica *F-Measure*) cae mucho menos.

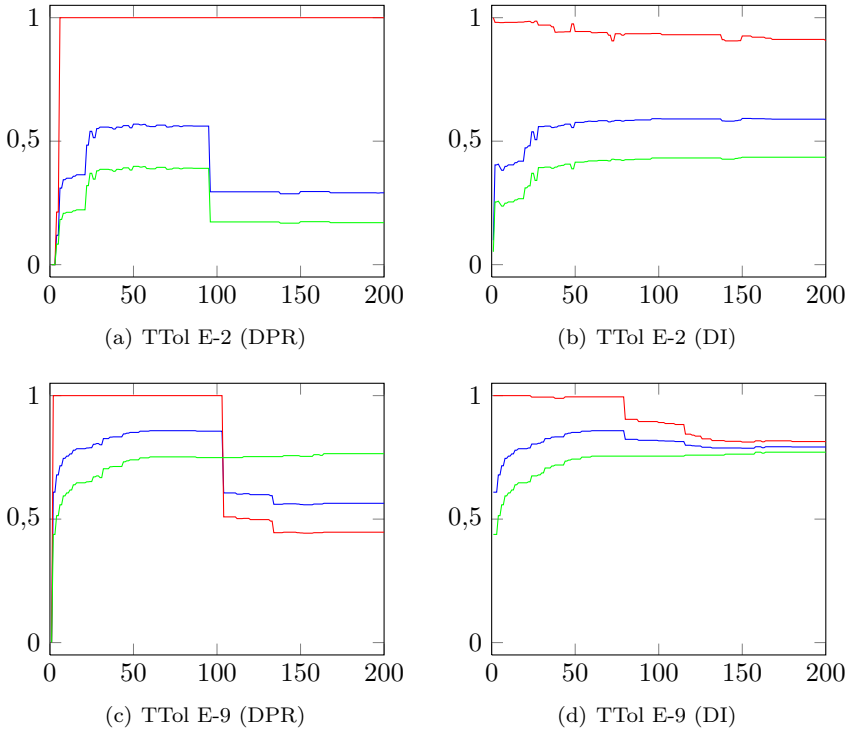
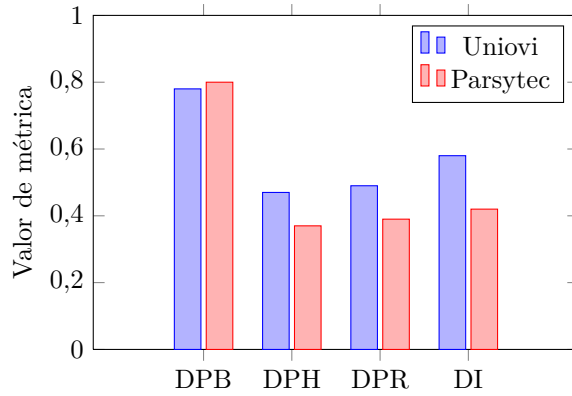


Figura 8.22: Análisis de sensibilidad de $TTol$ con DPR y DI

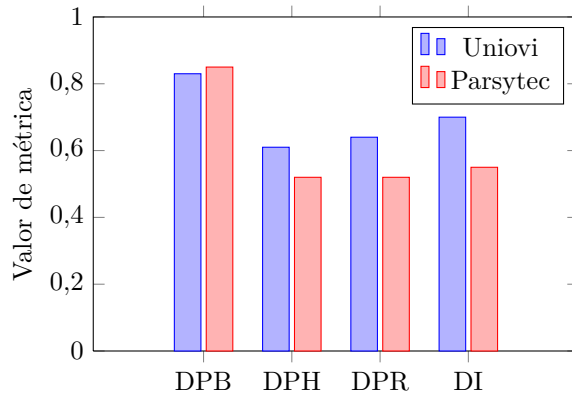
8.1.5. Análisis de resultados del entrenamiento

Una vez finalizada la fase de entrenamiento, es preciso analizar los resultados obtenidos para determinar qué configuración utilizar en la fase de *test* (configuración que, en principio, será la configuración definitiva de la herramienta de caracterización y utilizada cuando ésta esté operativa en planta) y el método de contabilización que se utilizará para valorar las detecciones, tanto de la herramienta de caracterización como del sistema Parsytec. En la figura 8.23 se comparan los resultados obtenidos por la herramienta de caracterización y el sistema Parsytec para todos los métodos de contabilización seleccionados y para las métricas de *Jaccard* y *F-Measure*.

En primer lugar, analizando los resultados obtenidos por la configuración óptima del método de contabilización binario por defecto periódico, éste podría descartarse. Dicha configuración favorece la detección de defectos periódicos muy incompletos siempre asegurando la no aparición de falsos positivos. Aún



(a) Jaccard

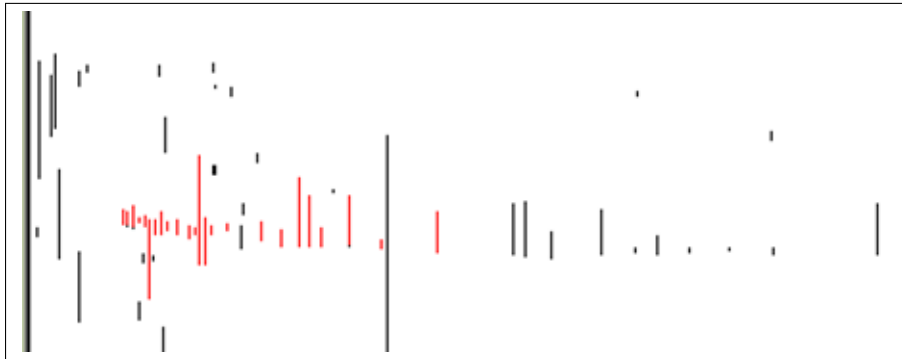


(b) F-Measure

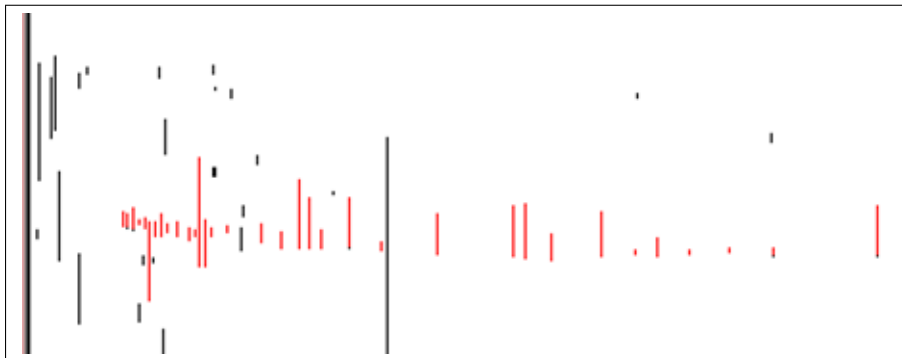
Figura 8.23: Resultados de la fase de entrenamiento

así, y puesto que los falsos positivos aparecidos para el resto de bandas del conjunto de entrenamiento, con los otros dos métodos de contabilización por defecto periódico, son pocos y siempre constituidos por un bajo número de defectos individuales, esta única ventaja de utilizar el método binario pierde valor. Además, el método de contabilización binario no permite diferenciar entre dos detecciones diferentes en las que no haya ni falsos positivos ni falsos negativos (hecho que ocurre frecuentemente), con lo que sería de poca ayuda durante la fase de *test* para cuantificar la diferencia de calidad de las detecciones realizadas por la herramienta de caracterización y el sistema Parsytec.

En la figura 8.24 se muestran las detecciones realizadas por la herramienta de caracterización utilizando la configuración óptima del método DPB (figura 8.24(a)) y del método DPR (figura 8.24(b)) para la banda E-12 (sólo se muestran los primeros 250 metros).



(a) Detección con configuración DPB



(b) Detección con configuración DPR

Figura 8.24: Comparativa entre los métodos DPB y DPR

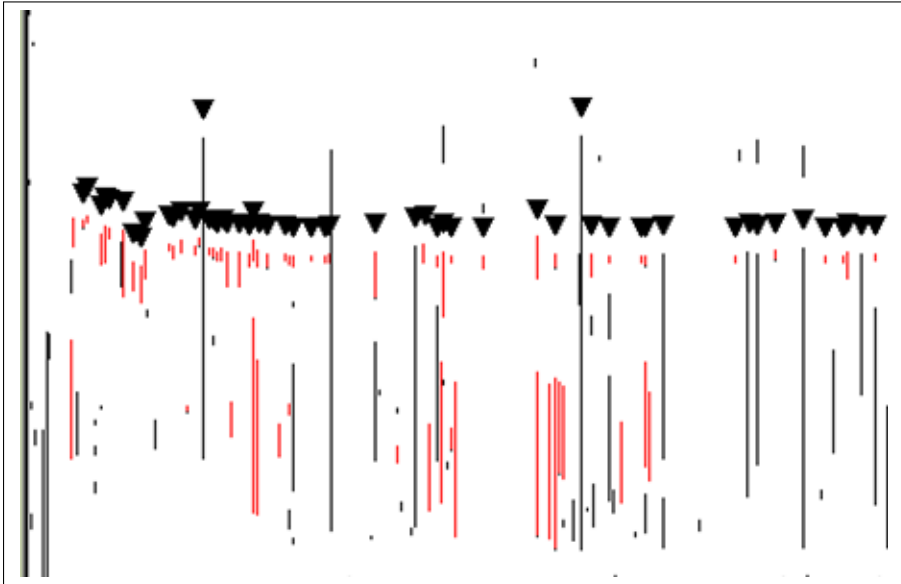
La detección realizada utilizando la configuración de DPR es claramente mejor que la obtenida por DPB, pese a que ésta fue calificada con un valor 1 por la métrica *F-Measure*, mientras que la obtenida por DPR fue calificada con un valor inferior (0,79). Ejemplos similares se repiten en varias de las demás bandas del conjunto de entrenamiento. Pese a que, en promedio, el valor de la métrica *F-Measure* de las detecciones realizadas utilizando el método de contabilización DPB con su configuración óptima es superior al obtenido utilizando el método de contabilización DPR con su correspondiente configuración óptima, las deteccio-

nes realizadas utilizando esta última son claramente mejores. Por estos motivos, este método de contabilización y su correspondiente configuración no serán utilizados para realizar la fase de *test* y para el futuro uso de la herramienta en instalaciones industriales.

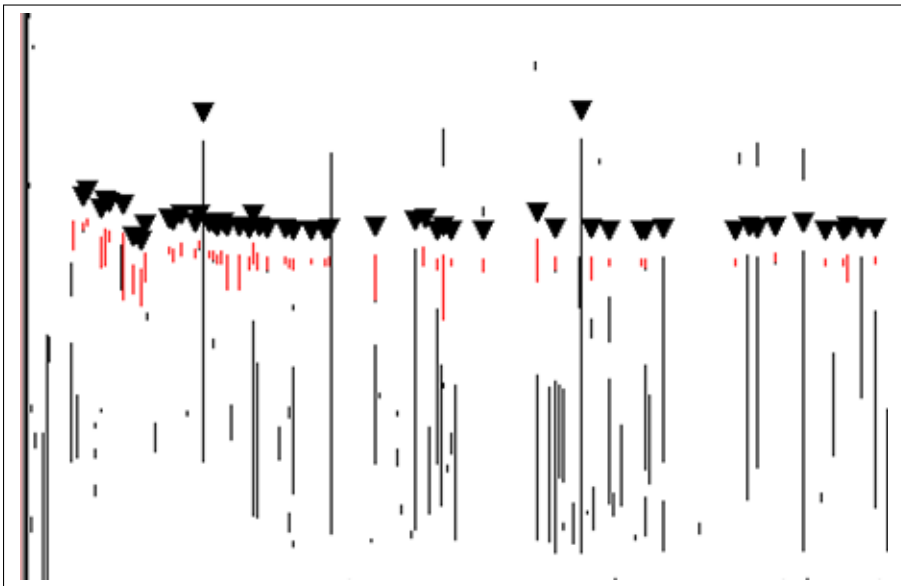
El método de contabilización por defecto individual tiene un comportamiento contrario al método binario por defecto periódico. Mientras que este último, como se acaba de comentar, tiende a realizar una detección incompleta de los defectos, la contabilización por defecto individual tiende a realizar detecciones "demasiado" completas, que en muchas ocasiones se traduce en la aparición de un gran número de defectos individuales falsos positivos. En la figura 8.25 se muestran las detecciones realizadas para la banda E-16 (sólo se muestran los primeros 250 metros) por la herramienta de caracterización con las configuraciones óptimas de cada uno de los citados métodos de contabilización. Pese a que en ambos casos el valor de la métrica *F-Measure* es muy parecido (0,53 con la configuración de DI y 0,58 con la configuración de DPR), la obtenida utilizando la configuración DI es mejor. Aunque en muchas ocasiones la configuración DI detecte los defectos periódicos de forma más completa, suele añadir defectos periódicos falsos positivos, como ocurre en este caso. Por estos motivos, la configuración del método DI también queda descartada para su futuro uso.

Las configuraciones óptimas calculadas utilizando los métodos de contabilización híbrido y real por defecto periódico suponen una solución de compromiso entre las obtenidas para la contabilización binaria por defecto periódico (más restrictiva, detecta defectos periódicos detectados de forma incompleta) y para la contabilización por defecto individual (más permisiva, tiende a detectar muchos falsos positivos). Las configuraciones óptimas para los métodos híbrido y real son idénticas tanto utilizando la métrica de *Jaccard* como *F-Measure*, con la excepción del parámetro *YRatio*, que tiene un valor del 9% con el método híbrido usando *Jaccard* (7% para el resto) y el parámetro *TTol* que tiene un valor de 44 utilizando la métrica de *Jaccard* y 56 utilizando la métrica *F-Measure* (para ambos métodos de contabilización). La diferencia entre las detecciones realizadas por la herramienta de caracterización utilizando un valor de *YRatio* de 7% ó 9% son mínimas. En ocasiones los defectos periódicos detectados están más completos con un valor de *YRatio* del 9% cuando el periodo teórico y el periodo real difieren significativamente, pero genera más falsos positivos para las bandas con una mayor densidad de defectos individuales. Puesto que el número de bandas con una diferencia grande entre el periodo teórico y el periodo real son muy pocas, es más conveniente fijar el parámetro al valor más conservador, 7%, que es el establecido para dicho parámetro por el método de contabilización real tanto para la métrica de *Jaccard* como para *F-Measure*.

El otro de los parámetros que difiere, *TTol*, influye en mayor medida en las detecciones realizadas. Como ya se comentó en los correspondientes análisis de sensibilidad, a un mayor valor de dicho parámetro se aumenta la probabilidad



(a) Detección con configuración DI



(b) Detección con configuración DPR

Figura 8.25: Comparativa entre los métodos DI y DPR

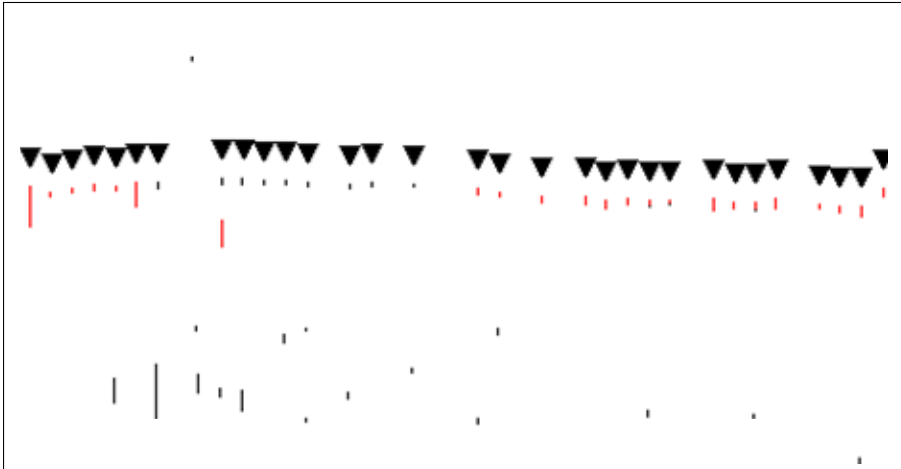
de detectar falsos positivos, pero también se disminuye la posibilidad de que aparezcan comportamientos atípicos como el comentado en la sección 8.1.1 e ilustrado en la figura 8.8. Además, para los casos en los que la posición transversal del defecto varíe (no es habitual), los defectos periódicos detectados están más completos. En la figura 8.26 se muestra parte de un defecto periódico cuya posición transversal varía en la parte final de la banda (se muestran los últimos 250 metros de la banda E-8). La figura 8.26(a) muestra la detección realizada cuando el valor del parámetro $TTol$ es 44, y en la figura 8.26(b) se muestra la detección realizada con un valor de 56. Se puede apreciar como en la zona en la que la posición transversal de los defectos varía, los defectos sólo son detectados en el caso de que el valor del parámetro $TTol$ es 56.

Al estar la figura agrandada para que puedan apreciarse las diferencias entre ambas detecciones es difícil notar la variación de la posición transversal del defecto. En la figura 8.27, que muestra la banda completa, se aprecia como las líneas rojas (que representan los defectos individuales que integran el defecto periódico) varían de posición en la zona inicial y la zona final de la banda.

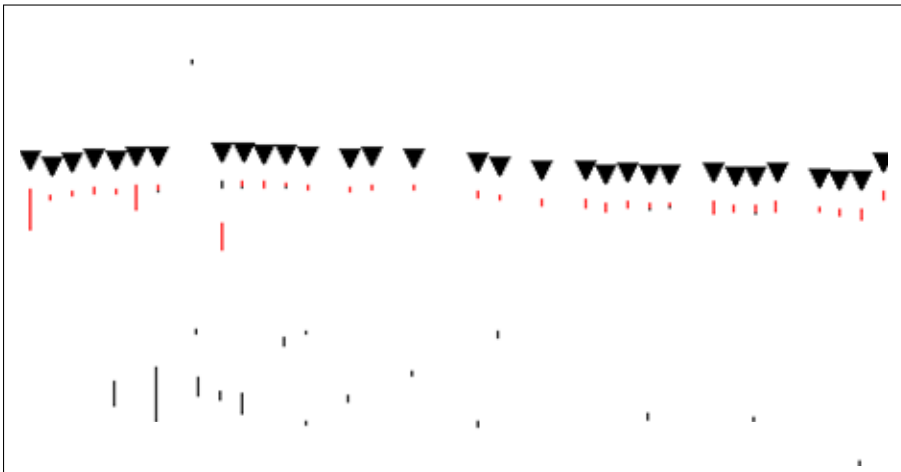
Debido a los motivos comentados en este apartado, la configuración que parece la más adecuada para establecer de forma definitiva a la herramienta de caracterización para realizar la fase de *test* y la posterior implantación industrial es la obtenida por el método de contabilización real por defecto periódico para la métrica *F-Measure*, mostrada en la tabla 8.5. Asimismo, se utilizará el método de contabilización real por defecto periódico para realizar la evaluación de las detecciones realizadas tanto por la herramienta de caracterización como por el sistema Parsytec para el conjunto de bandas de *test*.

Tabla 8.5: Configuración de parámetros definitiva

| Parámetro | Valor |
|-----------|-------|
| MinDefs | 18 |
| MaxSkips | 20 |
| ARatio | 100 |
| WidRatio | 100 |
| LenRatio | 100 |
| TTol | 56 |
| YRatio | 7 |



(a) $TTol = 44$



(b) $TTol = 56$

Figura 8.26: Comparativa entre valores de $TTol$

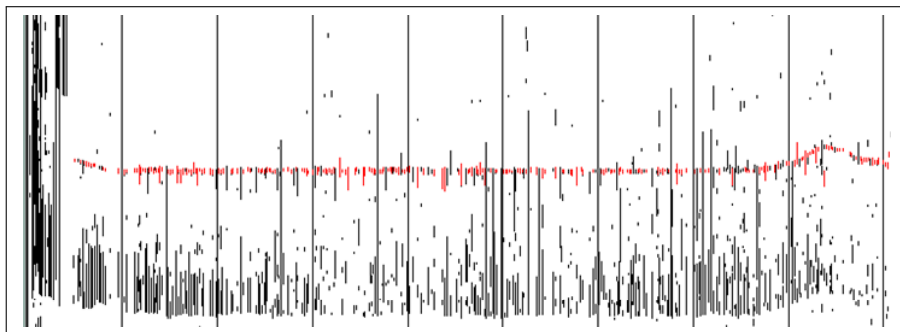


Figura 8.27: Detección del defecto periódico de la banda E-5

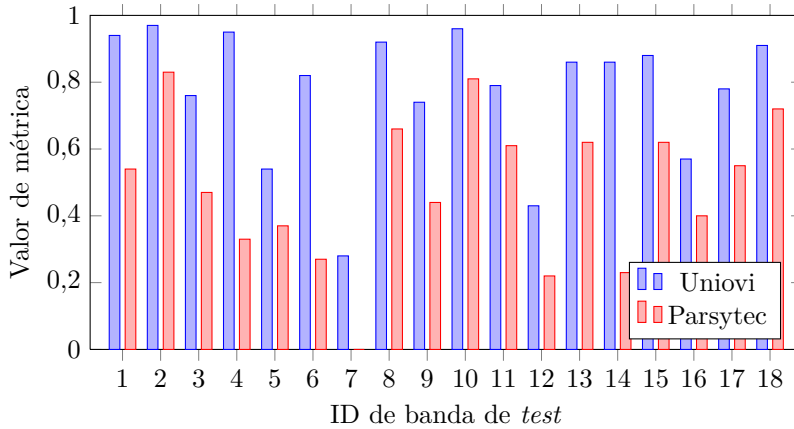
8.2. Fase de *test*

Una vez determinada la configuración de parámetros utilizada por la herramienta de caracterización y el método de contabilización a usar para la cuantificación de los resultados, el siguiente paso es realizar la detección de defectos periódicos en cada una de las bandas del conjunto de *test* utilizando la herramienta de caracterización y evaluar las detecciones realizadas por el sistema Parsytec. En la gráfica de la figura 8.28 se muestran los resultados obtenidos utilizando las métricas de *Jaccard* y *F-Measure*, y en la tabla 8.6 se recogen los datos más relevantes de los resultados de la fase de *test*.

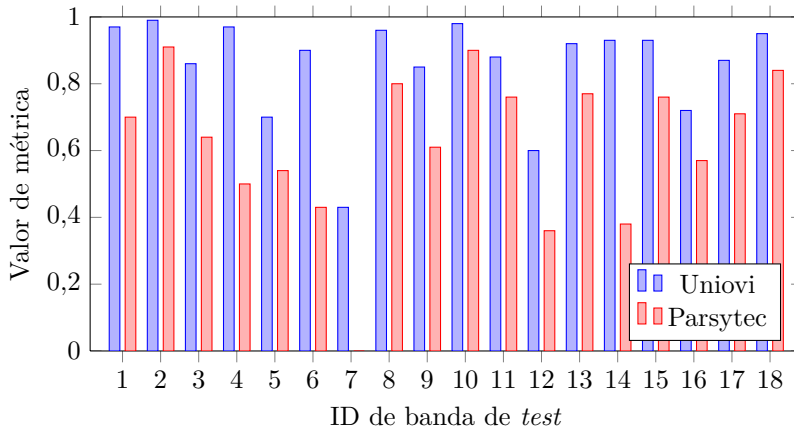
El promedio de las métricas de *Jaccard* para todo el conjunto de bandas de *test* para la herramienta de caracterización y el sistema Parsytec es 0,78 y 0,48 respectivamente. Utilizando la métrica *F-Measure*, los valores promedios son de 0,86 para la herramienta de caracterización y 0,62 para el sistema Parsytec. Estos resultados están representados gráficamente en la figura 8.29.

En 12 de las 18 bandas (T-1, T-2, T-4, T-6, T-8, T-9, T-10, T-13, T-14, T-15, T17 y T18) ambas herramientas detectaron todos los defectos periódicos existentes en el *ground truth* de las bandas sin generar defectos periódicos falsos positivos. En todos los casos el valor de la métrica *F-Measure* obtenido por la herramienta de caracterización fue superior por haber detectado los defectos periódicos de forma más completa.

En el caso particular de la banda T-11, mostrada en la figura 8.30, la herramienta de caracterización no detectó uno de los cuatro defectos periódicos existentes en el *ground truth*. Para que se puedan apreciar mejor las diferencias, sólo se muestra la parte central de los primeros 80 metros de la banda, donde se ven de forma casi íntegra tres de los cuatro defectos periódicos de dicha banda. En este caso no se muestran las cabezas de flecha que señalan qué defectos individuales forman parte de defectos periódicos en el *ground truth* al estar to-



(a) Jaccard



(b) F-Measure

Figura 8.28: Comparación de resultados de la fase de test

dos muy juntos (en ocasiones se solapan las cabezas de flecha con los propios defectos). En la figura 8.30(a) se muestran los defectos individuales detectados por Parsytec, pintados en rojo. Se aprecia como éstos forman tres defectos periódicos. El que está situado más cerca de la parte superior de la imagen, no fue detectado por la herramienta de caracterización (todos los defectos aparecen en negro). Sin embargo sí se aprecia como el que está situado más cerca de la parte inferior de la figura, está más completo en la detección realizada por la

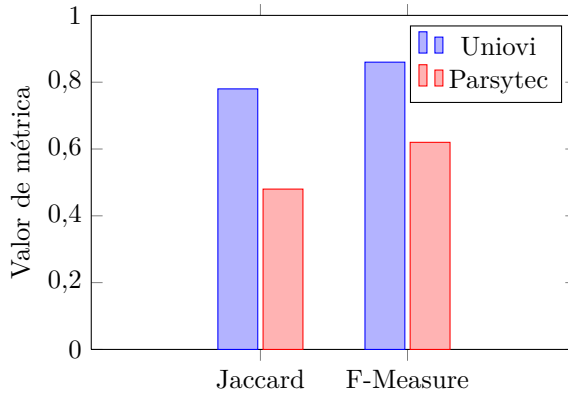
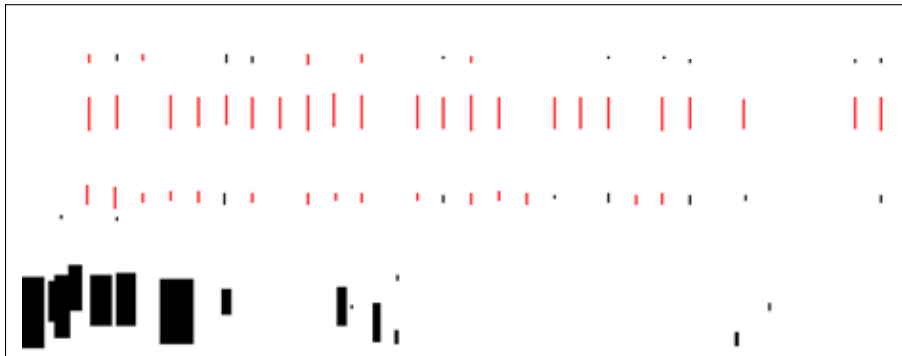


Figura 8.29: Resultados de la fase de *test*

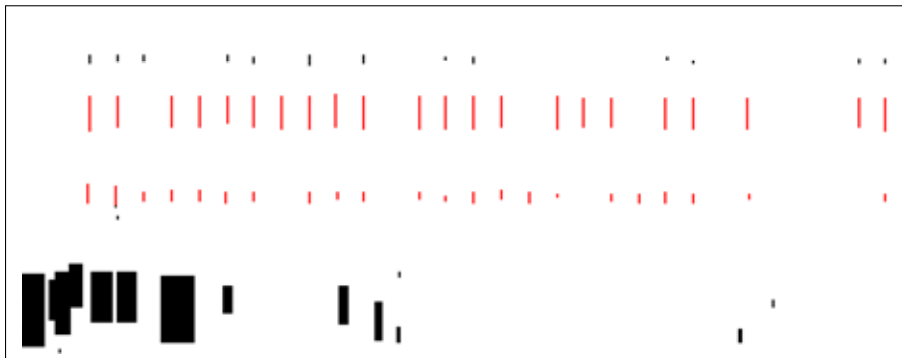
herramienta de caracterización.

El defecto periódico que quedó sin detectar es muy pequeño (17 defectos individuales). Puesto que el valor del parámetro *MinDefs* determinado es 18, este defecto no puede ser detectado con la configuración establecida. Sin embargo, teniendo en cuenta que los defectos periódicos que sí ha detectado en esta banda han sido generados todos por el mismo cilindro que el defecto periódico indeetectado, el problema se minimiza, ya que la herramienta habría generado un aviso de que dicho cilindro está defectuoso. Incluso teniendo un defecto periódico falso negativo que no tiene la solución devuelta por el sistema Parsytec, la solución de la herramienta de caracterización es más completa, al haber añadido a sus correspondientes defectos periódicos 184 de los 216 defectos individuales de naturaleza periódica existentes en esa banda frente a los 155 detectados por el sistema Parsytec.

La única banda para la que la solución generada por la herramienta de caracterización comete un fallo grave es la T-16. Dicha banda tiene cinco defectos periódicos, uno de ellos generados por el cilindro número 6 y el resto generados por el cilindro número 5. En la figura 8.31 se muestran las detecciones realizadas por la herramienta de caracterización y el sistema Parsytec para esta banda. En esta ocasión, las representaciones de las bandas están colocadas en vertical para poder mostrar las bandas de forma íntegra. Los cuatro defectos situados más a la izquierda en la figura son detectados por ambas herramientas. En segundo defecto periódico comenzando por la detecha, al estar separado de otros defectos periódicos, se pueden diferenciar con facilidad todos los defectos individuales que lo componen. Como en la mayoría de los casos, se puede comprobar como la herramienta de caracterización lo detectó de forma más completa. Sin



(a) Detección de Parsytec de la banda T-11



(b) Detección de la herramienta de caracterización de la banda T-11

Figura 8.30: Detecciones de la banda T-11

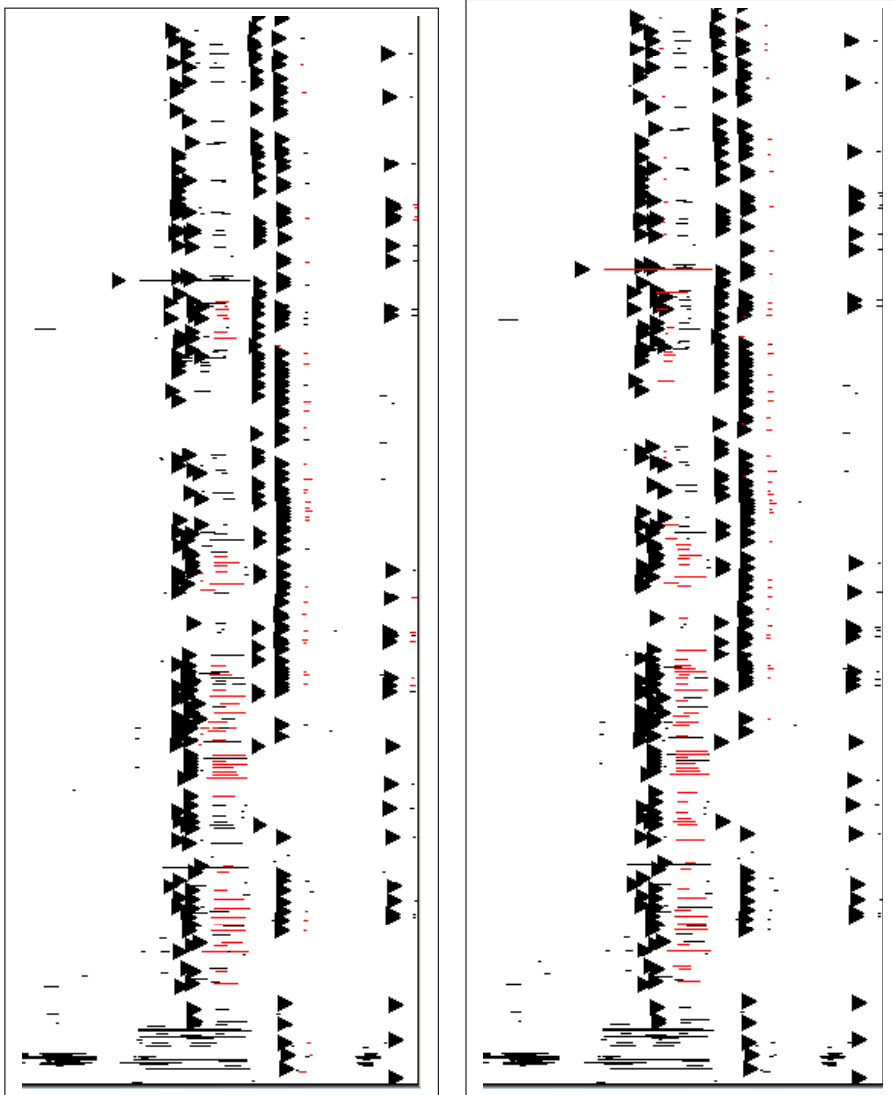
embargo, también se aprecia bien el defecto periódico situado más a la derecha, no detectado por la herramienta de caracterización y sí por el sistema Parsytec (aunque éste ha detectado un número muy bajo de los defectos individuales que lo integran). La herramienta de caracterización con la configuración utilizada para la fase de *test* no fue capaz de detectar este defecto periódico debido al gran número de defectos individuales no detectados de forma consecutiva que tiene. En la figura 8.31 se puede apreciar como este defecto está dividido en dos secciones, habiendo entre ellas un espacio grande sin ningún defecto individual. Dicho espacio se corresponde con más de 70 defectos individuales no detectados. Si se configura la herramienta de caracterización para permitir un número tan grande de defectos individuales no detectados de forma consecutiva (parámetro *MaxSkips*) este defecto periódico es detectado. Aunque esta configuración de

buenos resultados en este caso particular, proporcionaría resultados muy negativos para bandas con un elevado número de defectos superficiales, para las que detectaría un gran número de defectos periódicos falsos positivos. Por otra parte, es posible hacer que la herramienta detecte sólo la primera sección del defecto (suficiente para poder emitir un aviso de que el cilindro número 6 está generando defectos periódicos), si se asigna un valor de 35 al parámetro *MaxSkips*, al corresponderse este valor con el mayor número de defectos individuales no detectados de forma consecutiva en esta primera sección del defecto periódico. Aunque en menor medida, este elevado valor de parámetro *MaxSkips* generaría igualmente defectos periódicos falsos positivos en bandas con muchos defectos individuales. Por este motivo es más aconsejable no detectar defectos periódicos de estas características (poco frecuentes) que detectar falsos positivos en bandas que tengan muchos defectos individuales (más habitual).

Si el defecto periódico no detectado por la herramienta de caracterización hubiese sido uno de los generados por el cilindro número 5 el problema sería menor, ya que se habría generado igualmente un aviso de que dicho cilindro está defectuoso, debido al resto de defectos periódicos que sí fueron detectados. Sin embargo, el defecto periódico no detectado es precisamente el generado por el cilindro número 6, por lo que el aviso generado en este caso por la herramienta de caracterización sólo informaría de que está defectuoso el cilindro número 5, con lo que pese a tener que detener la producción para proceder a su sustitución, se seguirían produciendo defectos periódicos en las bandas que se laminan a continuación.

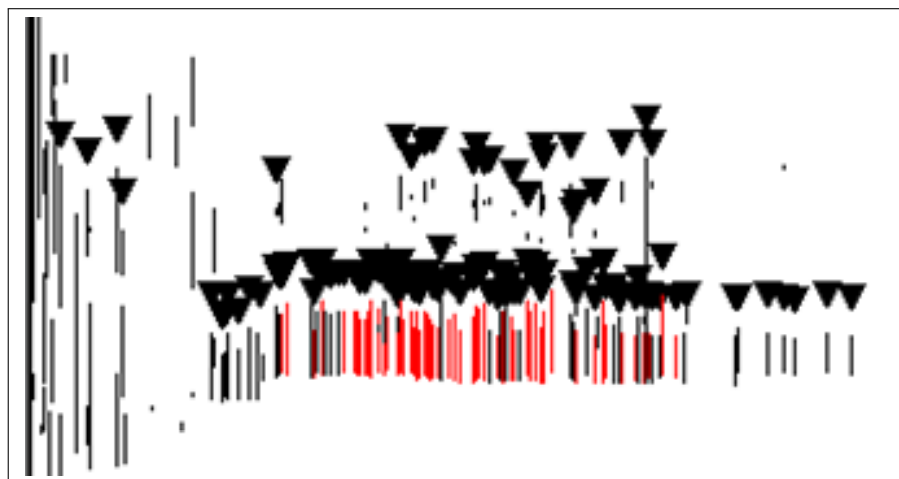
Por otra parte, en las detecciones de dos de las bandas (T-5 y T-12) realizadas tanto por la herramienta de caracterización como por el sistema Parsytec han aparecido sendos defectos periódicos falsos negativos. En ambos casos se trata de fallos en la detección de poca importancia, puesto que son defectos muy pequeños (formados por 25 y 24 defectos individuales respectivamente) y porque en ambas bandas existe otro defecto periódico cierto positivo generado por el mismo cilindro que generó el defecto periódico no detectado, por lo que ambas herramientas generarían sus respectivos avisos sobre el cilindro que está generando los defectos periódicos. En la figura 8.32 se muestran las detecciones realizadas por ambas herramientas para la banda T-5 (sólo se muestran los primeros 500 metros de la banda, donde están el 100 % de los defectos individuales pertenecientes a defectos periódicos). Se puede apreciar como uno de los dos defectos periódicos no es detectado en ambos casos. Nuevamente, puede comprobarse como el defecto periódico que sí es detectado, está mas completo en la detección realizada por la herramienta de caracterización.

Por último, las bandas T-3 y T-7 son aquellas para las que el sistema Parsytec ha cometido fallos más graves en la detección. En la primera de ellas, detectó dos defectos falsos positivos, los únicos que han sido detectados durante la fase de *test*. En la figura 8.33 se muestran las detecciones realizadas por ambas he-

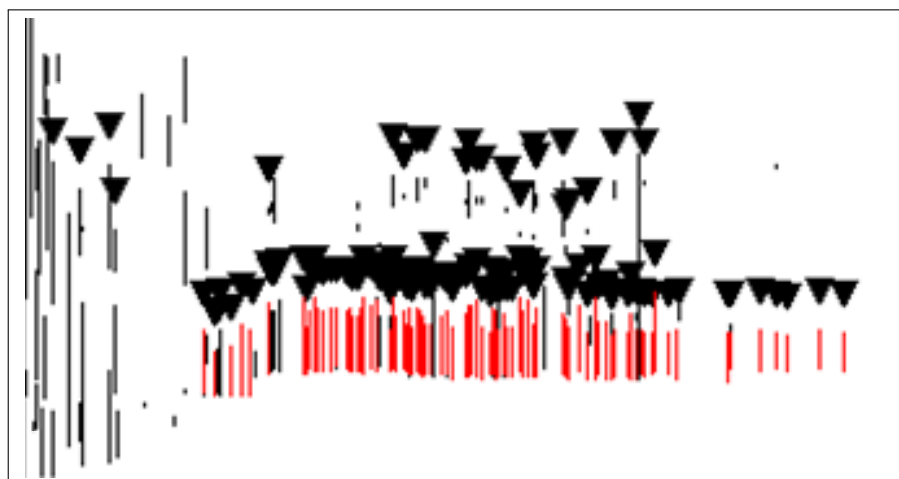


(a) Detección de Parsytec de la banda T-16 (b) Detección de la herramienta de caracterización de la banda T-16

Figura 8.31: Detecciones de la banda T-16



(a) Detección de Parsytec de la banda T-5

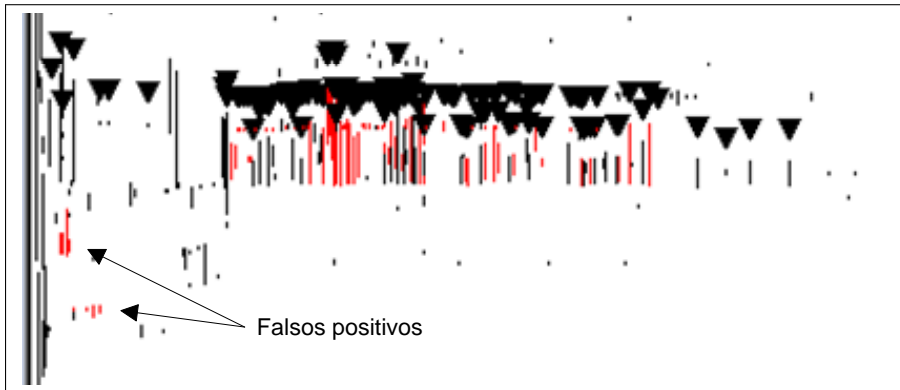


(b) Detección de la herramienta de caracterización de la banda T-5

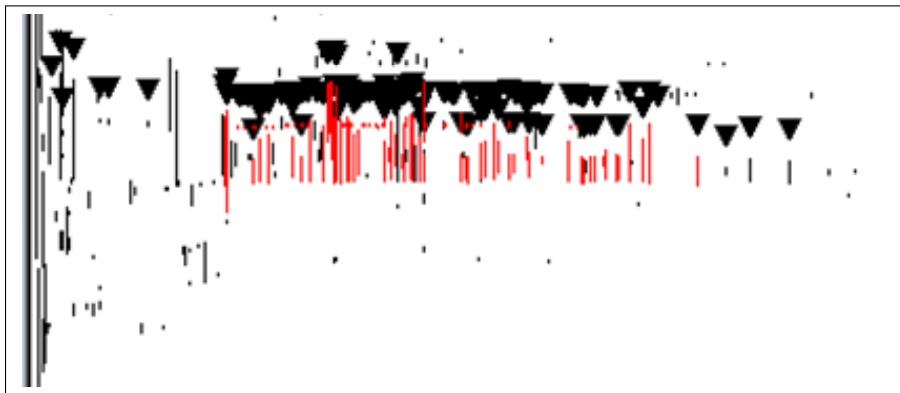
Figura 8.32: Detecciones de la banda T-5

ramientas, y donde se ven dos grupos de defectos individuales detectados por el sistema Parsytec y que no aparecen en el *ground truth* de la banda.

En el caso de la banda T-7, que tiene dos defectos periódicos en su *ground truth*, el sistema Parsytec no detectó ninguno de ellos. Sin embargo, la herramienta de caracterización detectó uno, quedando el otro sin detectar. En la



(a) Detección de Parsytec de la banda T-3

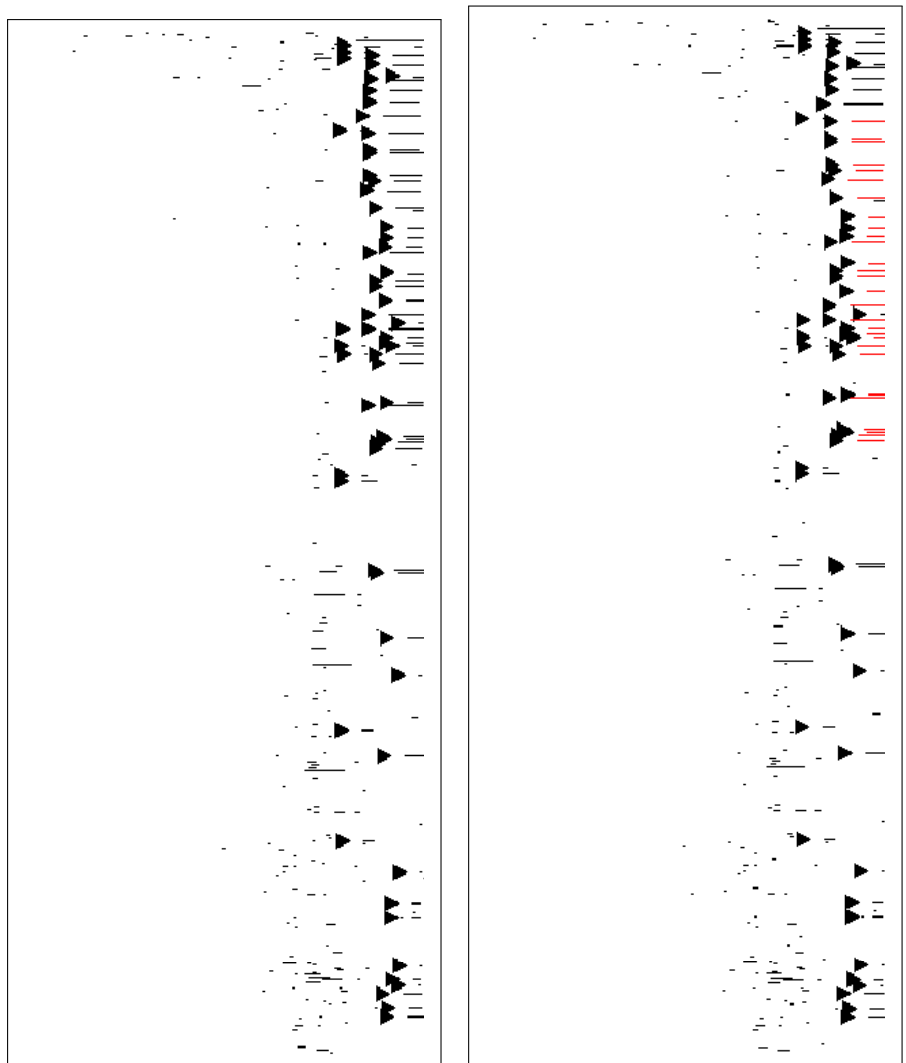


(b) Detección de la herramienta de caracterización de la banda T-3

Figura 8.33: Detecciones de la banda T-3

figura 8.34 se muestran ambas detecciones. Para poder mostrar ambas bandas íntegramente, éstas están colocadas en vertical. Se puede ver como el sistema Parsytec no ha detectado ningún defecto periódico, mientras que la herramienta de caracterización detectó uno de ellos, incluyendo en él aproximadamente la mitad de los defectos individuales que lo integran en el *ground truth*. Puesto que los dos defectos periódicos de esta banda han sido generados por el mismo cilindro, la herramienta puede igualmente generar el aviso acerca del cilindro defectuoso, al contrario del sistema Parsytec que no generaría aviso alguno pese a estar laminándose bandas de acero con un cilindro defectuoso.

De los resultados obtenidos de la fase de *test* se puede concluir que el funcio-



(a) Detección de Parsytec de la banda T-7

(b) Detección de la herramienta de caracterización de la banda T-7

Figura 8.34: Detecciones de la banda T-7

namiento de la herramienta de caracterización desarrollada es bueno. Tan sólo no generaría el aviso correspondiente en una de las 18 bandas utilizadas para el *test*, igual número que el sistema Parsytec, *state-of-the-art* en el campo de la detección de defectos periódicos. Además de este hecho, el valor promedio de la métrica *F-Measure* para el conjunto de bandas de entrenamiento es claramente superior, al detectar en prácticamente todos los casos, los defectos periódicos de forma mucho más completa. La tabla 8.6 muestra en detalle los resultados obtenidos para el conjunto de bandas de *test* por la herramienta de caracterización y por el sistema Parsytec. Concretamente, por cada banda se muestra el número de defectos periódicos que tiene en el *ground truth* y el número de defectos periódicos detectados tanto por la herramienta de caracterización como por el sistema Parsytec. También muestra el número de defectos individuales pertenecientes a defectos periódicos en el *ground truth* para cada banda y el número de defectos individuales incluidos en defectos periódicos por ambas herramientas. Por último, muestra las bandas para las cuales se generó un aviso correcto de los cilindros defectuosos.

Tras haber finalizado el *test* de la herramienta y analizando los resultados obtenidos se puede concluir que el comportamiento de la herramienta ante la tarea de realizar la detección de defectos periódicos sobre un conjunto de bandas que representan la diversidad de situaciones que pueden darse en una planta industrial real es bueno. Adicionalmente, también se puede considerar que se ha logrado una mejora en la calidad de la detección de los defectos periódicos en relación al sistema Parsytec y, por tanto, la herramienta de caracterización puede ser utilizada en una factoría real para realizar dicha tarea.

Tabla 8.6: Resultados obtenidos de la fase de *test*

| ID | Nº Defectos periódicos | Nº Defectos individuales | H. de caracterización | | | Sistema Parsytec | | |
|------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------|---------------------|-------------------|---------------------|---------------------|-------------------|
| | | | Nº DP detectados | Nº DI detectados | Aviso correcto | Nº DP detectados | Nº DI detectados | Aviso correcto |
| T-1 | 1 | 35 | 1 | 33 | Sí | 1 | 19 | Sí |
| T-2 | 1 | 214 | 1 | 210 | Sí | 1 | 181 | Sí |
| T-3 | 2 | 124 | 2 | 114 | Sí | 2 | 101 | Sí |
| T-4 | 1 | 39 | 1 | 37 | Sí | 1 | 13 | Sí |
| T-5 | 2 | 113 | 1 | 80 | Sí | 1 | 53 | Sí |
| T-6 | 1 | 22 | 1 | 21 | Sí | 1 | 6 | Sí |
| T-7 | 2 | 89 | 1 | 28 | Sí | 0 | 0 | No |
| T-8 | 1 | 142 | 1 | 130 | Sí | 1 | 94 | Sí |
| T-9 | 3 | 146 | 3 | 119 | Sí | 3 | 84 | Sí |
| T-10 | 2 | 340 | 2 | 326 | Sí | 2 | 279 | Sí |
| T-11 | 4 | 216 | 3 | 184 | Sí | 4 | 155 | Sí |
| T-12 | 2 | 79 | 1 | 37 | Sí | 1 | 19 | Sí |
| T-13 | 1 | 71 | 1 | 60 | Sí | 1 | 44 | Sí |
| T-14 | 1 | 43 | 1 | 37 | Sí | 1 | 10 | Sí |
| T-15 | 1 | 51 | 1 | 54 | Sí | 1 | 38 | Sí |
| T-16 | 5 | 395 | 4 | 245 | No | 5 | 177 | Sí |
| T-17 | 1 | 40 | 1 | 31 | Sí | 1 | 22 | Sí |
| T-18 | 1 | 97 | 1 | 88 | Sí | 1 | 70 | Sí |

Capítulo 9

Conclusiones

En este capítulo se muestran de forma resumida las conclusiones más relevantes que se pueden obtener a partir de todo el trabajo realizado, los objetivos alcanzados, la difusión de los resultados y las líneas de trabajo futuro que aparecen tras la finalización del presente trabajo.

9.1. Objetivos alcanzados y aportaciones

Al inicio de esta tesis se presenta el problema de detectar los defectos periódicos que aparecen frecuentemente en las superficies de las bandas de acero como consecuencia de algún tipo de deformación en la superficie de los cilindros de trabajo, que ejercen una gran presión sobre el acero caliente durante su laminación. Haciendo un análisis del estado del arte se pudo comprobar como la totalidad de los sistemas comerciales utilizados para la inspección de las bandas laminadas realizan detecciones de defectos superficiales pero no todos buscan un patrón repetitivo ni agrupan dichos defectos individuales en defectos periódicos. Partiendo de esta premisa se fijó como objetivo el desarrollo de una herramienta capaz de realizar esta tarea basándose en la detección previa de los defectos superficiales, tarea que realiza cualquier sistema de inspección. Aunque los datos utilizados para el diseño y prueba de la herramienta hayan sido proporcionados por la factoría de Arcelor-Mittal de Avilés, un objetivo importante fue que el producto desarrollado pueda utilizarse en cualquier otra instalación que tenga instalado un sistema que realice la detección de los defectos superficiales presentes en la banda.

En el capítulo 3 se recogen las técnicas existentes para la detección y clasificación de los defectos superficiales y cuyos resultados pueden ser utilizados como datos de entrada de la herramienta a desarrollar.

Puesto que para poder comparar los resultados obtenidos mediante la herramienta a desarrollar con aquéllos obtenidos por una herramienta comercial es necesario que éstos puedan ser cuantificados, fue necesario el desarrollo de una herramienta auxiliar que facilitase esta tarea. En el capítulo 4 se describe la problemática de realizar dicha clasificación manual sin la ayuda de una herramienta

informática, así como las características y funcionalidades de la herramienta de clasificación que fue desarrollada y utilizada para la clasificación de las bandas utilizadas posteriormente para el entrenamiento y *test* de la herramienta de caracterización.

En el capítulo 5 se describe el algoritmo que se utilizaría posteriormente para realizar tal clasificación, así como sus aspectos clave: almacenamiento de la información, detección y clasificación de defectos periódicos y la parametrización de dicha búsqueda.

En el capítulo 6 se estudian las distintas posibilidades existentes para cuantificar una detección de defectos periódicos. Esto supone estudiar las distintas posibilidades de contabilizar los aciertos y los fallos realizados por una herramienta al detectar defectos periódicos y el modo en que estos datos deben ser combinados para ofrecer un único resultado numérico son comparadas para determinar cual de ellas puede realizar una cuantificación más precisa.

Para poder obtener una configuración óptima de la herramienta desarrollada es necesario plantear una serie de pruebas que, utilizando un conjunto de datos representativo de la realidad, puedan determinar el valor más adecuado de cada parámetro con el fin de maximizar el valor de métrica de los resultados generados. En el capítulo 7 se plantean dichas pruebas y se analiza el modo más adecuado de llevarlas a cabo.

Por último, en el capítulo 8, se ejecutan dichas pruebas y sus resultados son analizados para determinar la eficacia de la herramienta desarrollada.

A partir del trabajo realizado durante todos estos pasos se puede elaborar una lista de los logros obtenidos en cada uno de ellos, enumerados a continuación:

- Se ha realizado un estudio del estado del arte en la detección y clasificación de defectos superficiales, así como en la detección de defectos periódicos. Dicho estudio puede utilizarse como punto de partida para abordar problemas similares.
- Se ha desarrollado una herramienta que facilita la detección y caracterización manual de los defectos periódicos presentes en una banda de acero. Dicha herramienta también puede ser utilizada para visualizar y analizar la detección de defectos individuales y/o periódicos de distintas bandas de acero y comparar visualmente los resultados proporcionados por distintas configuraciones de una misma herramienta o para comparar dos o más herramientas diferentes.
- Se ha diseñado una técnica que detecta los defectos periódicos de una banda de acero tomando como datos de entrada la posición y características de todos los defectos individuales de dicha banda. Dicha técnica puede utilizarse para desarrollar herramientas que realicen esta tarea con otros materiales además del acero.

- Puesto que uno de los objetivos era que la herramienta desarrollada proporcione sus resultados en un breve intervalo de tiempo, se debía encontrar un modo de almacenar la información de modo que proporcione un tiempo de acceso medio muy bajo. En este trabajo se ha propuesto el uso de matrices dispersas para tal fin, y se ha comprobado como ofrece unos resultados muy buenos, pudiéndose utilizar en una aplicación que ha de funcionar en tiempo real. Asimismo, el algoritmo desarrollado también cumple con dicho requisito. El tiempo medio empleado para realizar la detección y caracterización de defectos periódicos de una banda de acero no llega a los 10 segundos.
- Se han propuesto diferentes métodos para valorar las detecciones de los defectos periódicos, comentando las ventajas y los inconvenientes de cada uno de ellos. Dichos métodos pueden utilizarse para valorar los resultados proporcionados por otras herramientas implementadas que den solución a este problema o a problemas similares (como pueden ser la detección de defectos periódicos en otro tipo de productos laminados, como el papel).
- Se ha realizado un estudio sobre la aplicabilidad de tecnologías *grid* a problemas que requieren computación masiva. Dicho estudio fue utilizado como punto de partida para el diseño de una batería de experimentos que requieran la utilización intensiva de recursos computacionales.
- Se ha determinado la configuración óptima de la herramienta y se ha comprobado la eficacia de ella comparando sus resultados con los de una herramienta comercial ampliamente utilizada en todo el mundo. Las bandas utilizadas para realizar la experimentación correspondiente son bandas representativas de la realidad, todas ellas laminadas en la factoría de Arcelor-Mittal de Avilés y con características diversas.

Los objetivos alcanzados cubren a los planteados al inicio de esta tesis. Además, ésta puede ser utilizada como punto de partida de otras investigaciones.

9.2. Difusión de las aportaciones

Las aportaciones realizadas durante la elaboración de esta tesis han sido difundidas en varios congresos, detallados a continuación.

- *12th IAPR Conference on Machine Vision Applications*: En el artículo presentado en este congreso en Nara (Japón) en Junio de 2011 , se presenta la parte central de la tesis, en la que se diseña la técnica de detección de defectos periódicos [[Bulnes et al., 2011a](#)].

- *IAS Annual Meeting 2011*: El artículo que será presentado en este congreso en Orlando (Florida, EEUU) en Octubre de 2011 describe el problema de los defectos periódicos desde un punto de vista industrial, y cómo puede ser mejorado el proceso de detección de éstos utilizando la técnica propuesta. Adicionalmente, se describe el modo en que puede reducirse el espacio de búsqueda de este problema conociendo ciertos aspectos del proceso de laminación del acero y como crear de forma precisa el *ground truth* de un conjunto de bandas de acero que pueda ser utilizado para entrenar una nueva herramienta de detección de defectos periódicos o para valorar las detecciones realizadas por una herramienta en uso [Bulnes *et al.*, 2011c].
- *11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*: El artículo enviado a este congreso y que será presentado en Córdoba (España) en Noviembre de 2011, detalla los fundamentos de la técnica desarrollada, basada en el reconocimiento de un patrón periódico. Aunque se ejemplifica mediante el problema de la detección de defectos periódicos en bandas de acero, es presentado de un modo lo suficientemente genérico como para poder ser aplicado a un problema similar de un modo sencillo [Bulnes *et al.*, 2011b].
- *Parallel Processing for Imaging Applications 2011*: El artículo enviado a este congreso fue presentado en San Francisco (California, EEUU) en Enero de 2011. En éste se proponene la utilización de tecnologías *grid* para realizar tareas de entrenamiento y *test* utilizando un diseño experimental factorial completo, ejemplificado con el diseño experimental propuesto para el entrenamiento y *test* de la herramienta de caracterización desarrollada en esta tesis [Usamentiaga *et al.*, 2011].

9.3. Trabajo futuro

La herramienta de caracterización desarrollada, aunque obtiene buenos resultados, podría ser mejorada en varios aspectos. El primero sería tener en cuenta alguna característica adicional de los defectos individuales que haya sido obtenida por el sistema de visión por computador a la hora de realizar la agrupación en defectos periódicos. Otra mejora aplicable sería la de establecer más de una configuración óptima, y elegir la más adecuada en función de ciertas características de la banda a analizar. Puesto que la búsqueda de los defectos periódicos comienza a realizarse después de laminar la banda y cuando los datos generados por el sistema de visión por computador ya están disponibles, éstos podrían ser utilizados para elegir la configuración a utilizar. Por ejemplo, podría darse el caso en que una configuración más permisiva funcione mejor para aquéllas bandas con un bajo número de defectos individuales, y que en aquéllas bandas

con un elevado número de defectos individuales se obtengan mejores resultados utilizando una configuración más restrictiva. Antes de comenzar la detección de los defectos periódicos puede consultarse este dato (o cualquier otro que pueda ayudar a realizar una mejor detección) para aplicar una configuración u otra. Esto implicaría realizar una serie de experimentaciones en las que se agruparían las bandas en función de la característica o las características que se deseen analizar, y realizar una búsqueda de parámetros óptima para cada caso. En nuestro caso particular, al disponer de un reducido número de bandas para realizar todo el proceso de entrenamiento y *test*, esta experimentación no se ha podido llevar a cabo.

Del mismo modo, también es importante observar el comportamiento de la herramienta de caracterización funcionando en un entorno industrial real. La implantación de la herramienta en la factoría no se ha realizado todavía por causas ajenas a nuestra voluntad, pero se espera que pueda ser realizada en un futuro próximo y con ello poder analizar los resultados proporcionados por ésta y la mejora real que supone su uso con respecto al sistema Parsytec.

Bibliografía

- D. O. Aborisode (2009). Classification of Stainless Steel Strip Using Artificial Neural Network with Radial Basis Functions. *Research Journal of Applied Sciences*, **4**:págs. 225–229.
- A. Abuazza, D. Brabazon y M. A. El-Baradie (2003). Analysis of surface defects using a novel developed fiber-optics laser scanning system. *Journal of Materials Processing Technology*, **143-144**(1):págs. 875–879.
- A. Abuazza, D. Brabazon y M. A. El-Baradie (2004). Multi-beam fibre-optic laser scanning system for surface defect recognition. *Journal of Materials Processing Technology*, **155-156**(1-3):págs. 2065–2070.
- AMEPA (2010). AMEPA GmbH Angewandte Messtechnik und Prozessautomatisierung GmbH. Ver <http://www.amepa.de/>.
- ANDEC (2010). ANDEC Manufacturing Ltd. Ver <http://www.andec.on.ca/>.
- D. P. Anderson (2004). BOINC: A system for public-resource computing and storage. En *Proceedings - IEEE/ACM International Workshop on Grid Computing*, págs. 4–10.
- D. P. Anderson, J. Cobb, E. Korpela, M. Lebofsky y D. Werthimer (2002). SETI@home: An Experiment in Public-Resource Computing. *Communications of the ACM*, **45**(11):págs. 56–61.
- ARC (2011). NorduGrid - Advanced Resource Connector (ARC). Ver <http://www.nordugrid.org/middleware/>.
- J.-S. Bae y S.-Y. Kim (2001). Hot wire inspection using eddy current. En *Proc. 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf. IMTC 2001*, tomo 2, págs. 962–965.
- I. Baillie, P. Griffith, X. Jian y S. Dixon (2007). Implementing an ultrasonic inspection system to find surface and internal defects in hot, moving steel using EMATs. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, **49**(2):págs. 87–92.

- M. Baker, R. Buyya y D. Laforenza (2002). Grids and grid technologies for wide-area distributed computing. *Software - Practice and Experience*, **32**(15):págs. 1437–1466.
- C. M. Bishop (1995). *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford: Oxford University Press.
- H. Boerner y H. Strecker (1988). Automated X-Ray Inspection of Aluminium Castings. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **10**(1):págs. 79–91.
- A. Borselli, V. Colla y M. Vannucci (2011). Surface defects classification in steel products: A comparison between different artificial intelligence-based approaches. En *Proceedings of the 11th IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Applications, AIA 2011*.
- H. Brauer y M. Ziolkowski (2008). Eddy Current Testing of Metallic Sheets with Defects Using Force Measurements. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, **5**(1):págs. 11–20.
- F. G. Bulnes, D. F. Garcia, R. Usamentiaga y J. Molleda (2011a). A Technique for Clustering Individual Defects from Images of Steel Strips with Periodical Defects. En *MVA 2011: 12th IAPR Conference on Machine Vision Applications*, págs. 283–286.
- F. G. Bulnes, R. Usamentiaga, D. F. Garcia y J. Molleda (2011b). Detection of Periodical Patterns in the Defects Identified by Computer Vision Systems. En *ISDA 2011: 11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*, págs. In Press.
- F. G. Bulnes, R. Usamentiaga, D. F. Garcia, J. Molleda y J. L. Rendueles (2011c). Vision-based technique for periodical defect detection in hot steel strips. En *IAS 2011: Industry Applications Society Annual Meeting 2011*, págs. In Press.
- C. Butler y G. Gregoriou (1992). A novel non-contact sensor for surface topography measurement using a fibre optic principle. *Sensors and Actuators, A: Physical*, **31**(1-3):págs. 68–74.
- K. Choi, K. Koo y J. S. Lee (2006). Development of Defect Classification Algorithm for POSCO Rolling Strip Surface Inspection System. En *SICE-ICASE International Joint Conference*, págs. 2499–2502.
- P. Cielo (1988). *Optical Techniques for Industrial Inspection*. Academic Press, Boston.

- COGNEX (2010). Cognex SIS. Ver <http://www.cognex.com>.
- Condor (2011). Condor. Ver <http://www.cs.wisc.edu/condor/>.
- N. Cristianini y J. Shawe-Taylor (2005). *An Introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-based Learning Methods*. Beijing: China Machine Press.
- W. Daum y P. R. H. Heidt (1986). Automatic Recognition of Weld Defects in X-Ray-Inspection. *Materialprüfung*, **28**(6):págs. 177–180.
- T. Davis (2006). CSPARSE. A Concise Sparse Matrix Package in C. University of Florida. Ver <http://www.cise.ufl.edu/research/sparse/CSparse/>.
- DSIPLUS (2010). DSI Plus S.L. Ver <http://www.dsiplus.es>.
- S. C. Eisenstat, M. C. Gursky, M. H. Schultz y A. H. Sherman (1975). Yale sparse matrix package II. The Nonsymmetric Codes. Yale University. Ver <http://www.cs.yale.edu/publications/techreports/tr114.pdf>.
- M. Ellert, M. Gronager, A. Konstantinov, B. Konya, J. Lindemann, I. Livenson, J. L. Nielsen, M. Niinimaki, O. Smirnova y A. Waananen (2007). Advanced Resource Connector middleware for lightweight computational Grids. *Future Generation Computer Systems*, **23**(2):págs. 219–240.
- D. H. J. Epema, M. Livny, R. van Dantzig, X. Evers y J. Pruyne (1996). A worldwide flock of Condors: Load sharing among workstation clusters. *Future Generation Computer Systems*, **12**(1):págs. 53–65.
- H. Ewald y M. Stieper (1996). Classification of eddy current signals using fuzzy logic and neural networks. En *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*.
- Y. H. Fan y Y. Moalem (1998). Effective defect detection and classification methodology based on integrated laser scanning inspection and automatic defect classification. En *IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop*, págs. 266–271.
- Folding@home (2011). Folding@home. Ver <http://folding.stanford.edu/>.
- I. Foster (1995). *Designing and Building Parallel Programs*. Addison-Wesley.
- I. Foster y C. Kesselman (1997). Globus: A metacomputing infrastructure toolkit. *International Journal of High Performance Computing Applications*, **11**(2):págs. 115–128.

- I. Foster, C. Kesselman y S. Tuecke (2001). The anatomy of the grid: Enabling scalable virtual organizations. *International Journal of High Performance Computing Applications*, **15**(3):págs. 200–222.
- A. Ghosh, T. Guha, R. B. Bhar y S. Das (2011). Pattern classification of fabric defects using support vector machines. *International Journal of Clothing Science and Technology*, **23**(2):págs. 142–151.
- gLite (2011). gLite - Lightweight Middleware for Grid Computing. Ver <http://glite.cern.ch/>.
- Globus (2011). The Globus Alliance. Ver <http://www.globus.org/>.
- M. Hasheminejad, J. Murata y K. Hirasawa (1994). System identification using neural network with parametric sigmoid function. *Artificial Neural Networks in Engineering*, **4**:págs. 39–44.
- T. Hosoe, Y. Okami, K. Michishita y S. Fukuda (1974). Method and apparatus for identifying the periodicity of surface defects of strip materials.
- N. Hui-Fuang (2006). Automatic thresholding for defect detection. *Pattern Recognition Letters*, **27**(17):págs. 1644–1649.
- ISRAVISION (2010). ISRA VISION. Ver <http://www.isravisision.com/>.
- P. Jaccard (1901). Distribution de la flore alpine dans le bassin des Dranses et dans quelques régions voisines. *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles*, **37**:págs. 241–272.
- H. Jia, Y. L. Murphey, S. Jianjun y T. S. Chang (2004). An Intelligent Real-time Vision System for Surface Defect Detection. En *17th International Conference on Pattern Recognition*, tomo 3, págs. 239–242.
- G. W. Kang y H. B. Liu (2005). Surface Defects Inspection of Cold Rolled Strips Based on Neural Network. En *Machine Learning and Cybernetics, Proceedings of 2005 International Conference*, tomo 8, págs. 5034–5037.
- A. Kelemen, Y. Liang y S. Franklin (2002). *Recent Advances in Simulation, Computational Methods and Soft Computing*, cap. A Comparative Study of Different Machine Learning Approaches for Decision Making, págs. 181–186. WSEAS Press.
- W. Kerckel, A. Kisner, M. B. Klein, G. D. Bacher y B. Pouet (1999). In-process detection of weld defects using laser-based ultrasound. En *Proceedings of SPIE*, tomo 3852.

- B. Koblitz, N. Santos y V. Pose (2008). The AMGA metadata service. *Journal of Grid Computing*, **6**(1):págs. 61–76.
- C. Kwak, J. A. Ventura y K. Tofang-Sazi (2000). Neural network approach for defect identification and classification on leather fabric. *Journal of Intelligent Manufacturing*, **11**(5):págs. 485–499.
- J. Lawrence (1994). *Introduction to Neural Networks*. California Scientific Software Press.
- S. Lee, S. Y. Chung y R. Park (1990). A comparative performance study of several global thresholding techniques for segmentation. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, **52**(2):págs. 171–190.
- LISMAR (2010). LISMAR. Ver <http://www.lismar.com/index.html>.
- Y. C. Liu, Y. L. Hsu, Y. N. Sun, S. J. Tsai, C. Y. Ho y C. M. Chen (2010). A computer vision system for automatic steel surface inspection. En *Proceedings of the 2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2010*, págs. 1667–1670.
- L. P. M. Srinivas (1994). Genetic algorithm: a survey. *IEEE Computer*, **27**(6):págs. 17–22.
- E. N. Malamas, E. G. Petrakis, M. Zervakis, L. Petitb y J. Legatb (2003). A survey on industrial vision systems, applications and tools. *Image and Vision Computing*, **21**(2):págs. 171–188.
- MARKTEC (2010). MARKTEC. Ver <http://www.marktec.co.jp/e/index.html>.
- L. A. O. Martins, L. C. Pádua y P. E. M. Almeida (2010). Automatic detection of surface defects on rolled steel using Computer Vision and Artificial Neural Networks. En *36th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2010*.
- D. Mery, T. Jaeger y D. Filbert (2002). A review of methods for automated recognition of casting defects. *INSIGHT, Journal of the British Institute of Non-Destructive Testing*, **44**(7):págs. 428–436.
- MPICH (2011). MPICH: High-performance and Widely Portable MPI. Ver <http://www.mcs.anl.gov/research/projects/mpich2/>.
- NTD (2010). Introduction to Eddy Current Testing. Ver <http://www.ndt-ed.org/>.
- D. L. Olson y D. Delen (2008). *Advanced Data Mining Techniques*. Springer, 1^a ed^{ón}.

- C. Park, S. Choi y S. Won (2010). Vision-based inspection for periodic defects in steel wire rod production. *Optical Engineering*, **49**(1):págs. 017202.
- M. H. Park, I. S. Kim y Y. K. Yoon (1996). Ultrasonic inspection of long steel pipes using Lamb waves. *NTD and E International*, **29**(1):págs. 13–20.
- PARSYTEC (2010). ISRA VISION PARSYTEC. Ver <http://www.parsytec.de/>.
- U. Persson (1999). Fibre-optic surface-roughness sensor. *Journal of Materials Processing Technology*, **95**(1-3):págs. 107–111.
- C. Pieringer y D. Mery (2010). Flaw detection in aluminium die castings using simultaneous combination of multiple views. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, **52**(10):págs. 548–552.
- R. Pozo, K. Remington y A. Lumsdaine (2008). SPARSELIB++. National Institute of Standards and Technology. Ver <http://math.nist.gov/sparselib++/>.
- PVM (2011). PVM: Parallel Virtual Machine software package website. Ver http://www.csm.ornl.gov/pvm/pvm_home.html.
- P. Rizzo y F. L. di Scalea (2005). Ultrasonic inspection of multi-wire steel strands with the aid of the wavelet transform. *Smart Materials and Structures*, **14**(4):págs. 685–695.
- M. Romberg (2002). The UNICORE grid infrastructure. *Scientific Programming*, **10**(2):págs. 149–157.
- S. M. Rooks, B. Benhabib y K. C. Smith (1995). Development of an Inspection Process for Ball-Grid- Array Technology Using Scanned-Beam X-Ray Laminography. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology - Part A*, **18**(4):págs. 851–861.
- M. Ruda, A. Krenek, M. Mulas, J. Pospisil y Z. Sustr (2007). A uniform job monitoring service in multiple job universes. En *Proceedings of the 2007 Workshop on Grid Monitoring, GMW'07*, págs. 17–22.
- L. Ruiyu, D. Yanqiong, Z. Xuewu y C. Jiasheng (2008). Copper strip surface defects inspection based on SVM-RBF. En *Proceedings - 4th International Conference on Natural Computation, ICNC 2008*, págs. 41–45.
- SARCLAD (2010). Sarclad Ltd. Ver <http://www.sarclad.com/>.
- K. Schicktanz (1993). Automatic fault detection possibilities on nonwoven fabrics. *Melliand Textilberichte*, **74**:págs. 294–295.
- SETI@home (2011). SETI@home. Ver <http://setiathome.ssl.berkeley.edu/>.

- M. J. Shensa (1992). The discrete wavelet transform: wedding the à trous and Mallat algorithms. *IEEE Trans. on Signal Processing*, **40**(10):págs. 2464–2482.
- P. K. Simpson (1990). *Artificial Neural Systems: Foundations, Paradigms, Applications, and Implementations (Neural Networks, Research and Applications)*. Pergamon Press.
- I. Sáinz (2009). *Diseño y evaluación de técnicas de detección de defectos periódicos en la superficie de bandas de acero*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Oviedo.
- STRUCK (2010). Struck Innovative Systeme. Ver <http://www.struck.de/>.
- S. Sullivan (1986). Acquiring Images by LASER Scanning. En *National Electronic Packaging and Production Conference*, págs. 981–986.
- X. J. Tang (2004). *Genetic algorithms with application to engineering optimization*. Tesis Doctoral, University of Memphis.
- T. Tannenbaum, D. Wright, K. Miller y M. Livny (2001a). *Beowulf Cluster Computing with Linux*. MIT Press.
- T. Tannenbaum, D. Wright, K. Miller y M. Livny (2001b). *Beowulf Cluster Computing with Windows*. MIT Press.
- R. P. Tewarson (1973). *Sparse matrices (Part of the Mathematics in Science & Engineering series)*. Academic Press, Inc.
- D. Thain, T. Tannenbaum y M. Livny (2005). Distributed computing in practice: The Condor experience. *Concurrency Computation Practice and Experience*, **17**(2-4):págs. 323–356.
- G. Theis y T. Kahrs (2002). Fully automatic X-ray inspection of aluminium wheels. En *ECNDT 2002: 8th European Conference on Non-Destructive Testing*, págs. 17–21.
- UNICORE (2011). UNICORE - Distributed computing and data resources. Ver <http://www.unicore.eu/>.
- R. Usamentiaga, D. F. García, C. López y D. González (2006). A Method for Assessment of Segmentation Success Considering Uncertainty in the Edge Positions. *Eurasip Journal on Applied Signal Processing*, **2006**:págs. id. 27146.

- R. Usamentiaga, D. F. Garcia, J. Molleda, J. Sainz y F. G. Bulnes (2011). Parallel training and testing methods for complex image processing algorithms on distributed, heterogeneous, unreliable, and non-dedicated resources. En *Parallel Processing for Imaging Applications*, tomo 7872.
- T. Vilasmongkolchai, M. Noipitak, P. Kaewtrakulpong y A. Prateepasen (2010). Ultrasonic Inspection System for Detecting Small Flaws at Far Surface of Steel Plate. En *ECTI-CON 2010: International Conference on Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology*, págs. 168–172.
- C.-M. Wang, Y.-H. Yan, S.-L. Chen y Y.-L. Han (2007). Classification and recognition based on improved SVM for surface defects of cold strips. *Journal of Northeastern University*, **28**(3):págs. 410–413.
- WCG (2011). World Community Grid, technology solving problems. Ver <http://www.worldcommunitygrid.org>.
- C. J. Wu y M. Hamada (2000). *Experiments : planning, analysis, and parameter design optimization*. John Wiley & Sons, Inc.
- G. Wu, H. Kwak, S. Jang, K. Xu y J. Xu (2008). Design of online surface inspection system of hot rolled strips. En *Proc. IEEE Int. Conf. Automation and Logistics ICAL 2008*, págs. 2291–2295.
- R. Xu y I. Wunsch, D. (2005). Survey of clustering algorithms. *IEEE Transactions on Neural Networks*, **16**(3):págs. 645–678.
- X. J. Xue, C. K. Sun y S. H. Ye (2001). Laser scanning on-line inspection system for ball grid array coplanarity measurement. *Guangdian Gongcheng/Opto-Electronic Engineering*, **28**(1):págs. 39–42.
- W. A. Yasnoff, J. K. Mui y J. W. Bacus (1977). Error measures for scene segmentation. *Pattern Recognition*, **9**(4):págs. 217–231.
- X.-W. Zhang, Y.-Q. Ding, Y.-Y. Lv, A.-Y. Shi y R.-Y. Liang (2011). A vision inspection system for the surface defects of strongly reflected metal based on multi-class SVM. *Expert Systems with Applications*, **38**(5):págs. 5930–5939.
- Y. Zhang (1996). A survey on evaluation methods for image segmentation. *Pattern Recognition*, **29**(8):págs. 1335–1346.
- S. Zhao, H. Huang, F. Wang, Y. Li y G. Wei (2009). Estimating periodic length and defect coordinates from a series of integer values. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, **42**(4):págs. 516–523.

- H. Zhenga, L. Kongb y S. Nahavandia (2002). Automatic inspection of metallic surface defects using genetic algorithms. *Journal of Materials Processing Technology*, **125**:págs. 427–433.