

TESIS DOCTORAL

2020

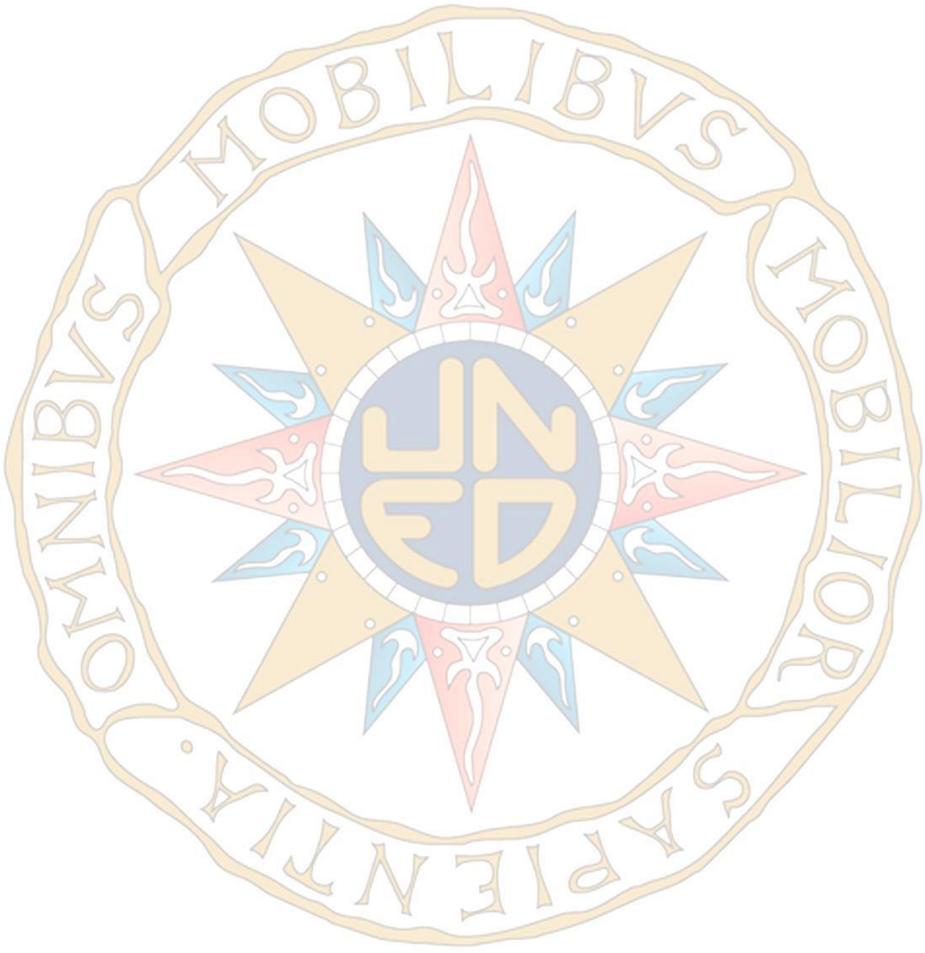
SISTEMA ASISTIDO PARA LA DECISIÓN ESTRATÉGICA Y PLANIFICACIÓN DE PROCESOS DE MANTENIMIENTO EN PLANTAS INDUSTRIALES

AUTOR: NÉSTOR RODRÍGUEZ PADIAL

PROGRAMA DE DOCTORADO EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

DIRECTORA: Dra. MARÍA ROSARIO DOMINGO NAVAS

CODIRECTORA: Dra. MARTA MARÍA MARÍN MARTÍN



TESIS DOCTORAL

2020



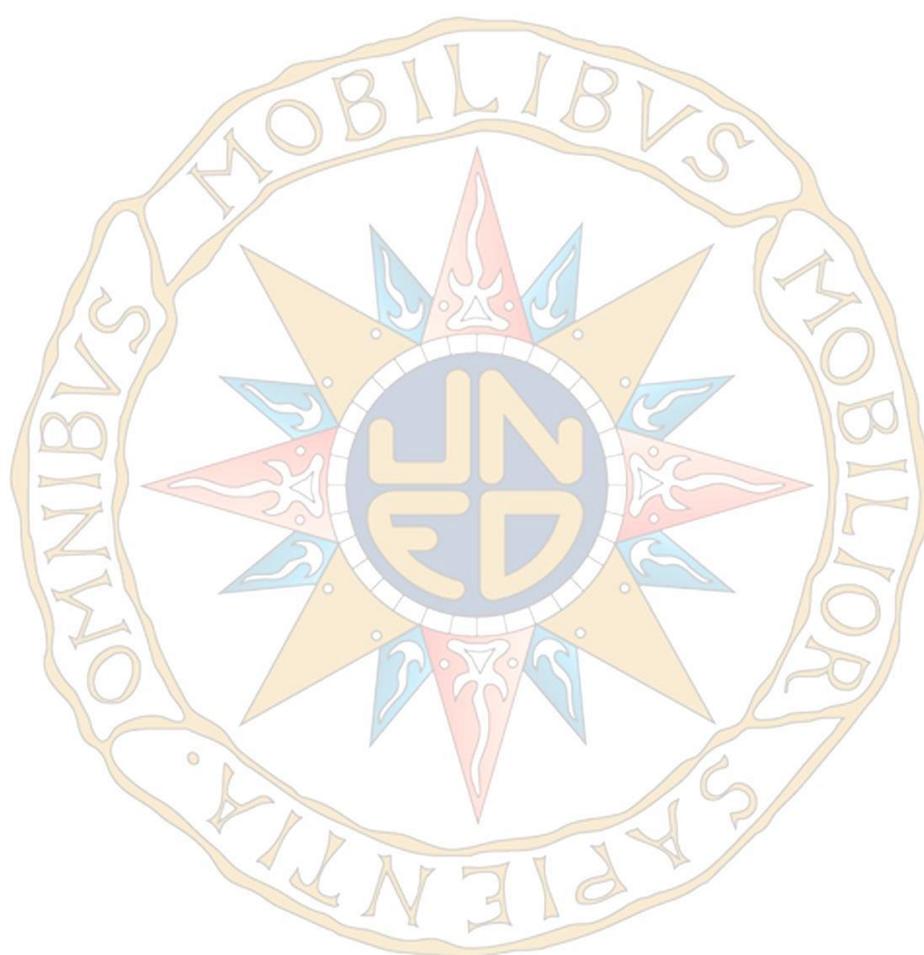
**SISTEMA ASISTIDO PARA LA DECISIÓN
ESTRATÉGICA Y PLANIFICACIÓN DE PROCESOS DE
MANTENIMIENTO EN PLANTAS INDUSTRIALES**

AUTOR: NÉSTOR RODRÍGUEZ PADIAL

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

DIRECTORA: Dra. MARÍA ROSARIO DOMINGO NAVAS

CODIRECTORA: Dra. MARTA MARÍA MARÍN MARTÍN



AGRADECIMIENTOS

Agradezco enormemente a mis directoras, María Rosario y Marta, por su especial atención, dedicación, muestras de ánimo y sabios consejos, que sin duda me han ayudado de forma inestimable en esta etapa de mi desarrollo académico y profesional.

Quiero agradecer y dedicar especialmente esta Tesis Doctoral a dos personas que son parte fundamental de mi vida, a mi esposa Marian y a mi hijo Ángel, pues a ellos les debo mucho tiempo que le he dedicado a este trabajo y no menor cantidad de paciencia e infinitas pruebas de amor que han puesto a mi disposición para poder desarrollarlo.

Agradezco a mis padres Francisco y Mariperta y a mi hermana Verónica, por su apoyo, ánimo y cariño incondicional.

Finalmente quiero dedicar este trabajo a las memorias de mis abuelos: Antonio, Dolores, Francisco y Lola, y a la memoria de mi primo Narci.

RESUMEN Y PALABRAS CLAVE

En un mercado globalizado, como en el contexto actual, los departamentos de mantenimiento se consideran claves para asegurar la función requerida de los sistemas productivos con bajos costes durante sus ciclos de vida. Esta situación plantea disponer de un sistema que asista a los expertos involucrados en departamentos de mantenimiento en su toma de decisiones y en la planificación de mantenimiento con fines estratégicos, considerando a su vez los objetivos tácticos y operativos, alineados entre sí, de forma que la toma de decisiones sea eficaz.

El objetivo general de esta Tesis Doctoral es la propuesta de diseño e implementación de un sistema de apoyo a la toma de decisiones y desarrollo de planes de mantenimiento personalizado a una planta productiva. La ventaja competitiva del sistema propuesto implica menor tiempo dedicado respecto a la toma de decisiones clásica, está basado en gran cantidad de datos recopilados de la planta, en métodos de éxito y con formato conductivo, empleando algoritmos de inteligencia artificial. El esquema del sistema de apoyo a la decisión propuesto se ha diseñado con una arquitectura modular y presenta refinamiento por mejora continua. Cada uno de los tres módulos que componen el sistema de apoyo a la decisión propuesto, presenta objetivos con distintos alcances (estratégico, táctico y operativo), además de una combinación de distintas metodologías y técnicas a integrar eficazmente para construir el mismo.

El principal objetivo, con alcance estratégico, integra las metodologías de cuadro de mando integral y proceso analítico jerárquico, involucrando indicadores claves de rendimiento del negocio industrial. El sistema de apoyo a la decisión ha sido modelado para identificar el área clave, como resultado entre cuatro áreas productivas propuestas por un panel de expertos.

El segundo objetivo, con alcance táctico, persigue inferir el comportamiento a medio plazo que exhibirá el área clave, en términos de fiabilidad. En este módulo, el sistema presenta dos fases; una exploratoria de datos con el uso algoritmos de reducción de dimensionalidad, y una predictiva empleando algoritmos de aprendizaje automático. Como resultado para el área estratégica se descubren patrones en órdenes de trabajo y se predicen indicadores de mantenimiento.

El tercer objetivo, con alcance operativo, persigue compilar y explotar el conocimiento histórico en cuanto a fallos y averías adquirido en la planta industrial a través del capital intelectual humano procedente de grupos de trabajo conformados al efecto. Se diseña una aplicación informática desarrollada al efecto para conducir el proceso completo de mantenimiento centrado en fiabilidad empleando razonamiento basado en casos. Integrando esta nueva funcionalidad en los módulos estratégico y táctico del sistema de apoyo a la decisión, se consigue alinear los objetivos operativos con los objetivos tácticos y estratégicos anteriormente citados, aumentando la eficacia en la toma decisional de la empresa y en el diseño del plan de mantenimiento de la planta.

Palabras Clave: Mantenimiento; Proceso Analítico Jerárquico (AHP); Cuadro de Mando Integral (BSC); Indicadores Clave de Rendimiento (KPI); Sistemas de Apoyo a la Decisión (DSS); Tablas Dinámicas; Aprendizaje Automático (ML), Análisis de Componentes Principales (PCA); Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM), Razonamiento Basado en Casos (CBR).

ABSTRACT AND KEYWORDS

In a globalized market, as in the current context, maintenance departments are considered key to ensure the required function of production systems with low costs during their life cycles. This situation raises having a system that assists the experts involved in maintenance departments in their decision-making and maintenance planning for strategic purposes, considering in turn the tactical and operational objectives, aligned with each other, so that the decision making is effective.

The general objective of this Doctoral Thesis is the proposal for the design and implementation of a support system for decision-making and the development of personalized maintenance plans for a production plant. The competitive advantage of the proposed system implies less time spent compared to classical decision-making, it is based on a large amount of data collected from the plant, on successful methods and with a conducive format, using artificial intelligence algorithms. The proposed decision support system outline has been designed with a modular architecture and features refinement for continuous improvement. Each of the three modules that make up the proposed decision support system, presents objectives with different scopes (strategic, tactical and operational), in addition to a combination of different methodologies and techniques to integrate effectively to build it.

The main objective, with a strategic scope, integrates the balanced scorecard methodologies and hierarchical analytical process, involving key performance indicators of the industrial business. The decision support system has been modeled to identify the key area, as a result among four productive areas proposed by a panel of experts.

The second objective, with tactical scope, seeks to infer the medium-term behavior that the key area will exhibit, in terms of reliability. In this module, the system presents two phases; an exploratory of data using the algorithms of reduction of dimensionality, and a predictive one using algorithms of machine learning. As a result for the strategic area patterns are discovered in work orders and maintenance indicators are predicted.

The third objective, with an operational scope, seeks to compile and exploit the historical knowledge regarding failures and breakdowns acquired in the industrial plant through human intellectual capital from working groups formed for this purpose. A computer application developed for this purpose is designed to drive the entire reliability-focused maintenance process using case-based reasoning. By integrating this new functionality into the strategic and tactical modules of the decision support system, it is possible to align the operational objectives with the aforementioned tactical and strategic objectives, increasing efficiency in the company's decision-making and in the design of the plant maintenance.

Key Words: Maintenance; Analytical Hierarchical Process (AHP); Balanced Scorecard (BSC); Key Performance Indicators (KPI); Decision Support Systems (DSS); Pivot tables; Machine Learning (ML), Principal Component Analysis (PCA); Reliability-Centered Maintenance (RCM), Case Based Reasoning (CBR).

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Lista de tablas _____	xi
Lista de figuras _____	xiii
Lista de acrónimos _____	xvii
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN _____	1
1.1. Introducción a la Tesis _____	3
1.2. Mantenimiento en los sistemas productivos _____	3
1.3. Sistema asistido para la toma de decisiones en los sistemas productivos _____	4
1.4. Sistema asistido para la toma de decisiones en el mantenimiento de los sistemas productivos _____	5
1.5. Estructura de la Tesis _____	5
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE _____	7
2.1. Introducción al capítulo _____	9
2.2. Clasificación de trabajos científicos _____	9
2.2. Estado del arte de la definición estratégica _____	12
2.3. Estado del arte de la definición táctica _____	14
2.4. Estado del arte de la definición operativa _____	17
2.5. Consideraciones finales _____	19
CAPÍTULO 3: BASES DEL SISTEMA ASISTIDO PARA LA DECISIÓN ESTRATÉGICA Y PLANIFICACIÓN _____	21
3.1. Introducción al capítulo _____	23
3.2. Estructura del sistema asistido para la decisión estratégica y planificación _____	23
3.3. Objetivo de la definición estratégica ante el problema de los activos en un contexto de mercado globalizado _____	28
3.4. Objetivo de la definición táctica ante el problema de la identificación y comportamiento de los equipos críticos _____	29
3.5. Objetivo de la definición operativa ante el problema de diseño sobre las acciones de mantenimiento _____	31

3.6. Consideraciones finales _____	32
CAPÍTULO 4: ESTRUCTURA METODOLÓGICA DEL SISTEMA ASISTIDO _____	35
4.1. Introducción al capítulo _____	37
4.2. Estructura y metodología del sistema asistido para la definición estratégica _	37
4.2.1. Panel experto y método de consenso (Delphi de dos etapas) _____	39
4.2.2. Modelo estratégico Cuadro de Mando Integral-Proceso Analítico Jerárquico _____	41
4.3. Estructura y metodología del sistema asistido para la definición táctica _____	42
4.3.1. Fase exploratoria de datos _____	45
4.3.2. Fase de análisis mediante aprendizaje automático _____	49
4.4. Estructura y metodología del sistema asistido para la definición operativa _____	55
4.4.1. Metodología del Mantenimiento Centrado en Fiabilidad _____	55
4.4.2. Metodología del Razonamiento Basado en Casos _____	59
4.4.2.1. Implementación de la metodología del Razonamiento Basado en Casos: JCOLIBRI _____	63
4.5. Consideraciones finales _____	66
CAPÍTULO 5: RESULTADOS _____	65
5.1. Introducción al capítulo _____	67
5.2. Resultados del sistema asistido para la definición estratégica _____	67
5.2.1. Modelado del esquema Proceso Analítico Jerárquico- Cuadro de Mando Integral en Expert Choice _____	67
5.2.2. Cuestionario para valoración del panel de expertos _____	68
5.2.3. Análisis de resultados en el ámbito estratégico _____	70
5.2.4. Análisis de sensibilidad _____	71
5.2.5. Análisis de la robustez de la decisión de expertos _____	73
5.3. Resultados del sistema asistido para la definición táctica _____	76
5.3.1. Análisis de los resultados en el ámbito táctico _____	90
5.4. Resultados del sistema asistido para la definición operativa _____	92
5.4.1. Base de casos _____	96
5.4.2. Diseño e implementación de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad conductivo: Aplicación _____	96

5.4.3. Uso de la aplicación para resolver mediante asistencia un nuevo caso de fallo_____	107
5.4.4. Análisis de resultados en el ámbito operativo_____	115
5.5. Consideraciones finales_____	118
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES_____	121
6.1. Introducción al capítulo_____	123
6.2. Conclusiones del sistema asistido para la definición estratégica_____	124
6.3. Conclusiones del sistema asistido para la definición táctica_____	126
6.4. Conclusiones del sistema asistido para la definición operativa_____	128
6.5. Conclusiones finales y desarrollos futuros_____	131
CAPÍTULO 7: REFERENCIAS_____	135
CURRICULUM VITAE_____	145

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Mapeado de enfoque metodológico y nivel, con diferentes técnicas y herramientas_____	11
Tabla 4.1. Objetivos estratégicos e indicadores de rendimientos clave KPI _____	39
Tabla 4.2. Panel de expertos, según categoría e implicación en la decisión estratégica_____	41
Tabla 4.3. Atributos originales de la orden de trabajo de mantenimiento_____	47
Tabla 4.4. Atributos originales del informe de fabricación (base de datos de producción)_____	51
Tabla 5.1. Resultados PCA. Valores de componentes principales_____	78
Tabla 5.2. Atributos de la base de casos. Encabezados de las columnas del fichero de base de datos CSV_____	94
Tabla 5.3. Registros del fichero CSV que conforma la base de casos. Atributos {IDP, S, I, E, FF, IDS, F, FM, FE, NPR, PT, MC, II, R}_____	95
Tabla 5.4. Mapeado de atributos de la base de casos y variables implementadas en la aplicación AIRCM_____	101
Tabla 5.5. Base de casos en fichero RCM_EW.csv con el nuevo caso ID=36 registrado_____	114
Tabla 5.6. Simulaciones realizadas para validación de la aplicación AIRCM_____	116
Tabla 5.7. Simulaciones de casos planteados y casos similares recuperados _____	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Clasificación de artículos bibliográficos para Sistemas de apoyo a Decisión de Mantenimiento_____	10
Figura 3.1. Estructura modular del marco propuesto: sistema asistido para la decisión de mantenimiento_____	24
Figura 3.2. Sistema de apoyo a la decisión de mantenimiento, punto de vista de usuario_____	26
Figura 3.3. Arquitectura de los sistemas de apoyo a la decisión y gestión de mantenimiento_____	27
Figura 3.4. Relación de objetivos a distintos niveles y métodos empleados_____	28
Figura 4.1. Modelo de decisión jerárquica de cuadro de mando BSC-AHP propuesto para el módulo M1_____	38
Figura 4.2. Modelo BSC-AHP del M1 para las 4 áreas productivas AP _i y vectores de priorización V _p (AP _i)_____	42
Figura 4.3. Datos importados desde el GMAO, tablas dataWO (a) y dataWOF (b)_____	45
Figura 4.4. Técnicas de Aprendizaje Automático (ML)_____	52
Figura 4.5. Red neuronal artificial de regresión entrenada perceptrón multicapa “back-propagation”_____	54
Figura 4.6. Enfoque RCM, estructurado con hojas de trabajo información, diagrama de decisión y registro de decisión_____	57
Figura 4.7. Detalle del diagrama de decisión RCM_____	57
Figura 4.8. Detalle de una hoja de trabajo típica de información_____	58
Figura 4.9. Detalle de una hoja de trabajo típica de decisión_____	58
Figura 4.10. Ciclo estándar de la metodología CBR_____	61
Figura 4.11. Arquitectura de jCOLIBRI 2_____	64
Figura 4.12. Código fuente Java de Interfaz de Aplicación CBR_____	64
Figura 4.13. Diagrama de Clases con la estructura de los casos en jCOLIBRI 2_____	66
Figura 5.1. Modelo AHP-BSC ponderado en el entorno Expert Choice_____	68
Figura 5.2. Priorización de perspectivas y variables, juicio de expertos combinados_____	69

Figura 5.3. Priorización de variables, juicio de expertos combinados _____	70
Figura 5.4. Resultado de selección del modelo AHP-BSC _____	71
Figura 5.5. Representación de análisis de sensibilidad del modelo AHP-BSC en función de las perspectivas _____	72
Figura 5.6. Representación de análisis de sensibilidad del modelo AHP-BSC para las variables KPI de proceso _____	73
Figura 5.7. Representación de análisis de sensibilidad del modelo AHP-BSC para las variables KPI de cliente _____	73
Figura 5.8. Representación de análisis de sensibilidad gradiente para el modelo AHP-BSC por cada perspectiva _____	75
Figura 5.9. (a) Varianza de componentes principales. (b) Datos proyectados en componentes principales _____	77
Figura 5.10. (a) Dendrograma (b) datos (c) red neuronal SOM entrenada. (d) topología SOM _____	80
Figura 5.11. (a) Red neuronal artificial SOM entrenada. (b) grupos naturales de la topología SOM _____	81
Figura 5.12. ANN de regresión entrenada para las máquinas de papel M1 y M2 ____	82
Figura 5.13. (a) Entrenamiento de ANN para M1; (b) Ajuste de regresión _____	83
Figura 5.14. (a) Entrenamiento de ANN para M2; (b) Ajuste de regresión _____	84
Figura 5.15. Salida, variables medidas (azul) vs predicciones (rojo). (a) M1, (b) M2	86
Figura 5.16. ANN de regresión entrenada para las máquinas de papel conjuntas M1+M2 _____	87
Figura 5.17. (a) Entrenamiento de ANN para M1+M2; (b) Ajuste de regresión ____	88
Figura 5.18. Salida, variables medidas (azul) vs predicciones (rojo). (a) MTBF, (b) MTTR _____	90
Figura 5.19. Entorno de desarrollo Java en el IDE eclipse bajo la perspectiva jCOLIBRI _____	98
Figura 5.20. Configuración de la función de similitud del método NN bajo la perspectiva jCOLIBRI _____	99
Figura 5.21. Extracto de código Java/jCOLIBRI para el método ciclo (cycle) y la actividad RECUPERACIÓN _____	102

Figura 5.22. Extracto de código Java/jCOLIBRI para el método ciclo (cycle) y la actividad REUTILIZAR jCOLIBRI_____	103
Figura 5.23. Extracto de código Java/jCOLIBRI para el método ciclo (cycle) y la actividad REVISAR_____	104
Figura 5.24. Extracto de código Java del método cycle y la actividad REVISAR (2ª etapa) RCM conductivo_____	105
Figura 5.25. Extracto parcial del algoritmo que implementa diagrama decisional RCM en la actividad REVISAR (2ª etapa) del método cycle, para asignar el valor final de la clasificación de mantenimiento_____	106
Figura 5.26. Extracto de código Java/jCOLIBRI para el método ciclo (cycle) y la actividad RETENER_____	107
Figura 5.27. Icono de lanzamiento de la aplicación AIRCM (arriba) y ventana inicial para información de entrada ejecutándose en sistema operativo Windows 10_____	108
Figura 5.28. Entrada de datos del problema (arriba) y ventana de salida con los 3 casos más similares_____	109
Figura 5.29. Ventana de salida con el nuevo caso elegido y pendiente de revisión	110
Figura 5.30. Ventanas de revisión de datos para el nuevo caso elegido, mediante preguntas del contexto operativo_____	111
Figura 5.31. Ventana de revisión de datos para el nuevo caso elegido, mediante preguntas de contexto operativo. 2ª etapa, RCM conductivo para aplicar la política de mantenimiento_____	112

LISTA DE ACRÓNIMOS

AHP.	Analytic Hierarchy Process. Proceso Analítico Jerárquico.
AIRCM.	Artificial Intelligence Reliability-Centered Maintenance. Mantenimiento Centrado en Fiabilidad conductivo mediante Inteligencia Artificial.
ANN.	Artificial Neural Network. Redes Neuronales Artificiales.
AIRCM.	Artificial Intelligence Reliability-Centered Maintenance. Mantenimiento Centrado en Fiabilidad conductivo mediante Inteligencia Artificial.
ANN.	Artificial Neural Network. Redes Neuronales Artificiales.
ANP.	Analytic Network Process. Proceso Analítico en Red, generalización de AHP.
BCM.	Business Centred Maintenance. Mantenimiento Basado en Negocio.
BSC.	Balanced ScoreCard. Cuadro de Mando Integral.
CBR.	Case-based Reasoning. Razonamiento Basado en Casos.
CMMS.	Computerized Maintenance Management System, ver GMAO.
CSV.	Comma-Separated Values. Valores Separados por Comas.
DB.	DashBoard. Cuadro de Mando de Indicadores de Rendimiento.
DT.	Decision Tree. Árbol de decisión.
DM.	Data Mining. Minería de Datos.
DSS.	Decision Support System. Sistema de Apoyo a la Decisión.
EBRCM.	Experience Based Reliability-Centered Maintenance. RCM Basado en Experiencia.
FAHP.	Fuzzy Analytic Hierarchy Process. Proceso Analítico Jerárquico Difuso.
FL.	Fuzzy Logic. Lógica Difusa ó Lógica Borrosa.
FMECA.	Failure Mode, Effect and Criticality Analysis. Análisis de Modo de Fallos, Efectos y Criticidades.
FCM.	Fuzzy C-Means. Algoritmo de Agrupamiento Difuso.
GHSOM.	Growing Hierarchical Self-Organizing Map. Mapa Jerárquico Auto-organizado en Crecimiento.
HAZOP.	Hazard and Operability Study. Análisis Funcional de Operabilidad.
IDE.	Integrated Development Environment. Entorno de Desarrollo Integrado.
LCC.	Life-Cycle Cost. Coste de Ciclo de Vida.
IRCMA.	intelligent RCM analysis. Análisis Inteligente RCM.
KBS.	Knowledge-Based System. Sistema Basado en Conocimiento.
KPI.	Key Performance Indicator. Indicador de Rendimiento Clave.
k-means.	Algoritmo de agrupamiento k-medias.
kNN.	k Nearest Neighbour. k Vecinos más cercanos.
MDSS.	Maintenance Decision Support System. Sistema de Apoyo a la Decisión.
MPI.	Maintenance Performance Indicator. Indicador de Rendimiento de Mantenimiento.
MTBF.	Mean Time Between Failure. Tiempo Medio Entre Fallos.

MTTF.	Mean Time To Failure. Tiempo Medio Hasta el Fallo.
MTTR.	Mean Time To Repair. Tiempo Medio de Reparación.
NN.	Nearest Neighbour. Vecino más cercano.
NPR.	Número de Prioridad de Riesgo.
NRSM.	Neighborhood Rough Set Method. Método de conjunto aproximado del vecindario.
OT.	Orden de Trabajo.
OEE.	Overall Equipment Effectiveness. Eficiencia Global de los Equipos.
PI.	Performance Indicator: Indicador de Rendimiento.
PT.	Petición de Trabajo.
RCM.	Reliability-Centered Maintenance. Mantenimiento Basado en Fiabilidad.
SOM.	Self-Organizing Map. Mapa Auto-Organizado.
SQL.	Structured Query Language. Lenguaje de Consulta Estructurada.
TPM.	Total Productive Maintenance. Mantenimiento Productivo Total.
XML.	Extensible Markup Language. Language de Mercado Extensible.

CAPÍTULO 1:

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción a la Tesis_____	3
1.2. Mantenimiento en los sistemas productivos _____	3
1.3. Sistema asistido para la toma de decisiones en los sistemas productivos _	4
1.4. Sistema asistido para la toma de decisiones en el mantenimiento de los sistemas productivos _____	5
1.5. Estructura de la Tesis_____	5

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN A LA TESIS

Los sistemas productivos de las plantas industriales suelen tener objetivos diferentes en función las características del producto final, en cuanto a su concepción y la cantidad a obtener que condicionan el tipo de procesos de fabricación y las configuraciones productivas; así es posible encontrar escenarios donde predomina la flexibilidad, el coste, la calidad o los plazos de entrega. No obstante, existe un denominador común como es la eficiencia de la gestión del sistema con independencia de la planta de que se trate [Slack y Brandon-Jones, 2019].

Además en estas plantas industriales, las acciones de mantenimiento requieren especial atención debido a que contribuyen a la continuidad de la producción; debido a ello, se han planteado trabajos para alcanzar de manera eficiente esa integración como el llevado a cabo por Feng et al. [Feng et al., 2018] donde plantean la optimización de la flexibilidad en células de fabricación junto con planes de mantenimiento preventivo, o el trabajo de Quiñones-Sinisterra y Cavalcante [Quiñones-Sinisterra y Cavalcante, 2020] donde integran la programación de la producción con la planificación de la inspección.

1.2. MANTENIMIENTO DE LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS

En el apartado anterior, se ha visto la necesidad de integrar acciones de mantenimiento con las de producción debido a que el manteniendo de las instalaciones industriales es una actividad básica para el buen funcionamiento de las mismas. La norma UNE-EN 13306 [2018] define el mantenimiento como “combinación de todas las

acciones técnicas, administrativas y de gestión realizadas durante el ciclo de vida de un elemento, destinadas a conservarlo o a devolverlo a un estado en el que pueda desempeñar la función requerida”; como puede observarse, esta definición también contempla la fase de gestión en la que pueden aglutinarse las decisiones estratégicas, tácticas u operativas, pues de hecho la misma norma define la gestión del mantenimiento como “todas las actividades de la gestión que determinan los requisitos, los objetivos, las estrategias y las responsabilidades del mantenimiento y la implantación de dichas actividades por medios tales como la planificación del mantenimiento, el control de éste y la mejora de las actividades de mantenimiento y las cuestiones económicas”.

Además, la norma UNE-EN 15341 [UNE-EN 15341, 2008] define un conjunto de indicadores clave en el ámbito del mantenimiento, en los campos económicos, técnicos y organizativos, que dan idea de la difícil tarea que supone abordar la gestión del mantenimiento. De hecho, alcanzar planes de mantenimiento eficientes en las plantas industriales es muy complejo pues se han de definir simultánea y rápidamente acciones de mantenimiento junto con el análisis de costes de mantenimiento, las pérdidas de producción y el valor de los repuestos [Faccio et al., 2014], a lo que habría que añadir los posibles riesgos para la seguridad. En consecuencia, se necesitan herramientas adicionales que faciliten la toma de decisiones con información en tiempo real.

1.3. SISTEMA ASISTIDO EN LA TOMA DE DECISIONES EN LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS

La información requerida para la toma de decisiones en una empresa es cada vez mayor ante la globalización del mercado y la personalización de productos, por lo que los sistemas asistidos para la toma de decisiones pueden ser un instrumento muy válido en la gestión de las plantas industriales. Pueden observarse planteamientos para la

toma de decisiones en el ámbito productivo como el mostrado por Pei [Pei, 2013] enfocado a una línea de producción.

1.4. SISTEMA ASISTIDO PARA LA TOMA DE DECISIONES EN EL MANTENIMIENTO DE LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS

Ante esta complejidad, se han desarrollado sistemas para facilitar la toma de decisiones en este ámbito. Erozan [Erozan, 2019] proponen un método para gestionar el mantenimiento de los componentes críticos. Celen y Djurdjanovic [Celen y Djurdjanovic, 2020] desarrollan un método para la toma de decisiones que permite combinar la programación del mantenimiento con secuenciación de las operaciones de producción. Con todo ello, queda reflejada la importancia del desarrollo de este tipo de sistemas.

1.5. ESTRUCTURA DE LA TESIS

Para desarrollar la presente Tesis alrededor de los ejes expuestos, el documento se estructura en siete capítulos, cuyo contenido se resume a continuación.

En este Capítulo se introduce la necesidad de los sistemas asistidos en la toma de decisiones para realizar el diseño y planificación de mantenimiento a los entornos reales de funcionamiento de los sistemas productivos en plantas industriales.

En el Capítulo 2 se analizan las distintas técnicas empleadas en esta Tesis Doctoral contrastando los trabajos científicos más relevantes en el ámbito de la toma de decisiones y la planificación del mantenimiento industrial; así mismo se adoptan tres criterios fundamentales para su estudio: herramientas tecnológicas, metodologías y nivel de alcance u horizonte de consecución temporal de los objetivos.

El Capítulo 3 establece las bases sobre las que se apoya el sistema asistido para la decisión y planificación, tanto en su estructura como en la definición de los tres

objetivos: estratégicos, tácticos y operativos a conseguir alinear. Esta división, conforme a las tres definiciones, marcan la división modular de la estructura del sistema asistido a lo largo de todos los capítulos de la presente Tesis Doctoral.

En el Capítulo 4 se describen pormenorizadamente los modelos desarrollados en los tres módulos estructurales, conforme a sus tres definiciones. En el primer módulo se ha empleado un modelo de toma de decisiones estratégicas con un enfoque de cuadro de mando integral, empleando métodos de consenso para que la decisión sea colegiada por un panel de expertos. El segundo módulo, de definición táctica, se ha usado un modelo basado en datos permitiendo extraer conocimiento, a priori oculto y predecir las tendencias futuras de los indicadores claves de mantenimiento, empleando herramientas de aprendizaje automático. Para el tercer módulo, de definición operativa, se ha empleado un modelo de diseño de planes de mantenimiento centrado en fiabilidad conducido por una herramienta de razonamiento basado en casos, desarrollada para aplicar la misma en entornos reales de plantas industriales.

El Capítulo 5 muestra los resultados obtenidos en cada uno de los módulos y la conexión entre los mismos, pues la secuencia modular de la estructura del diseño asistido permite que la información de salida, obtenida como resultado de un módulo, sea la información de entrada del módulo siguiente.

Las conclusiones finales de la presente Tesis Doctoral se describen en el Capítulo 6, desde el punto de vista de cada definición, como la conclusión final como resultado de aplicación del sistema asistido para la decisión y planificación del mantenimiento en una planta industrial. Se completa el mismo con una serie de posibles desarrollos futuros del presente trabajo.

En el Capítulo 7 se enumeran las referencias bibliográficas citadas. Se incluye al final el Currículum Vitae del autor de la presente Tesis Doctoral.

CAPÍTULO 2:

ESTADO DEL ARTE

2.1. Introducción al capítulo _____	9
2.2. Clasificación de trabajos científicos _____	9
2.3. Estado del arte de la definición estratégica _____	12
2.4. Estado del arte de la definición táctica _____	14
2.5. Estado del arte de la definición operativa _____	17
2.6. Consideraciones finales _____	19

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

2.1. INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO

En este capítulo se compendian una serie de trabajos científicos que emplean, de algún modo, algunas de las herramientas y enfoques metodológicos que serán usadas en la presente Tesis Doctoral. La combinación de herramientas y metodologías serán divididas según su alcance temporal en tres niveles; largo, medio y corto plazo, según el plazo de respuesta de la decisión tomada.

Esta división por niveles coincide con la división modular del marco propuesto en la presente Tesis Doctoral, por lo tanto, en el presente capítulo se establecerá una división del estado del arte según las definiciones estratégica, táctica y operativa, conforme a los tres niveles indicados anteriormente.

2.2. CLASIFICACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICOS

los trabajos científicos más relevantes se han clasificado conforme a tres criterios: herramientas usadas para la resolución del problema, enfoque mediante metodologías usadas y el nivel o alcance que supone un impacto de la decisión en el tiempo; tal como se muestra en el esquema de la Figura 2.1.

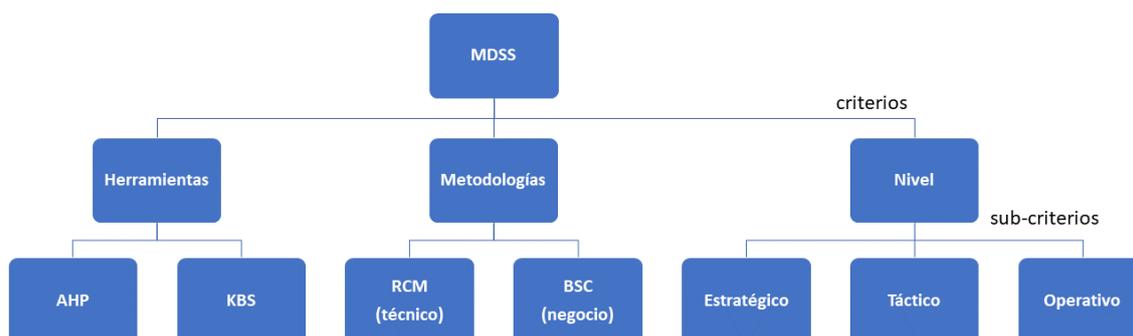


Figura 2.1. Clasificación de trabajos científicos más relevantes para Sistemas de apoyo a Decisión de Mantenimiento

Dentro de cada criterio se han considerado sub-criterios, para las herramientas en Proceso Analítico Jerárquico (AHP) desarrollado por Saaty [Saaty, 2012] y Sistemas Basados en Conocimiento (KBS), para el enfoque metodológico en aquellos de tipo económico, Cuadro de Mando Integral (BSC) o tipo técnico, Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM) y el nivel se clasifica en estratégico, táctico y operativo según el alcance sea de largo, medio o corto plazo. La Tabla 2.1 muestra el mapeado de los artículos más relevantes encontrados a nivel global en la bibliografía para mostrar el estado actual de los sistemas de apoyo a la decisión de mantenimiento (MDSS).

Aunque existen normas para la correcta aplicación de las metodologías RCM [UNE_EN_60300-3-11, 2013] y AMFEC [UNE-EN_60300-3-1, 2005], el enfoque planteado por Waeyenbergh y Pintelon [Waeyenbergh y Pintelon, 2002] proporciona un concepto personalizado, más flexible, que los estándares de planificación de mantenimiento {RCM, BCM, TPM, LCC}. Se trata de un sistema de apoyo a la decisión de mantenimiento cuya herramienta principal es de tipo Árbol de Decisión de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (considerando evaluación económica) y usando ambos enfoques, de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM) y Cuadro de Mando Integral (BSC) como Indicador de Rendimiento, Performance Indicator (PI), para la mejora continua a nivel táctico.

Tabla 2.1. Mapeado de enfoque metodológico y nivel, con diferentes técnicas y herramientas

Artículo Bibl.	Herramientas		Metodología		Nivel		
	AHP	KBS	RCM	BSC	Estratégico	Táctico	Operativo
[Cheng et al., 2007]	X	•	•	X	X	•	•
[Huang, 2009]	•	•	X	•	•	•	X
[Huang et al., 2011]	•	X	X	•	•	X	X
[Gabbar et al., 2003]	X	•	•	X	X	•	•
[Pujadas y Chen, 1996]	X	•	•	X	X	•	•
[Rosqvist et al., 2007]	X	•	•	•	•	•	•
[Diez-Olivan et al., 2019]	X	•	X	X	X	•	•
[Waeyenbergh y Pintelon, 2002]	X	•	•	•	X	•	X

El trabajo de Rosqvist [Rosqvist et al., 2009] concibe el sistema de ayuda a la planificación y programación de mantenimiento conforme a la herramienta basada en conocimiento (KBS), usando los enfoques combinados Experience based-RCM y Cuadro de Mando Integral (BSC) para alinear los objetivos estratégicos, Key Performance Indicator (KPI), del negocio de la empresa, y los tácticos, PI y operativos de la planta, MPI (Maintenance Performance Indicator). Diez-Olivan [Diez-Olivan et al., 2019] resume y analiza los sistemas basados en conocimiento (KBS) aplicados al fallo desde una triple perspectiva: descriptiva (causa raíz), predictiva (monitorización) y prescriptiva (acción)

mantenedora). El trabajo de Huang [Huang, 2009] presenta un sistema de apoyo a la decisión estratégica, automatizando la planificación estratégica y táctica, combinando las herramientas de Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y mecanismos de razonamiento (KBS), con el Cuadro de Mando Integral (BSC), con un enfoque más amplio el trabajo de Huang [Huang et al., 2011] concluye que la herramienta Proceso Analítico Jerárquico (AHP) combinada con la metodología de Cuadro de Mando Integral (BSC) es una herramienta muy eficaz y versátil para implementar y ejecutar planes estratégicos en empresas de diversa índole, válido tanto para empresas de nueva creación como consolidadas, y para todos los departamentos (financiero, mantenimiento, calidad y comercial) . Se centra en cómo los directores priorizan objetivos y miden con el cuadro de mando. En la definición operativa Cheng [Cheng et al., 2008] presenta una herramienta KBS de Razonamiento Basado en Casos (CBR), para realizar una conducción asistida del proceso de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM), lo que permite reducir el tiempo dedicado a los expertos en RCM, posibilitando asistir más fácilmente a las empresas para conseguir sus niveles tácticos y operativos en el área de mantenimiento. Por otro lado, el trabajo de los autores Pujadas y Chen [Pujadas y Chen, 1996] integran los enfoques metodológicos RCM y teoría de las limitaciones, TOC de su acrónimo en inglés, para posibilitar la planificación del mantenimiento industrial, incorporando las restricciones de la producción en la planificación de mantenimiento. Gabbar [Gabbar et al., 1996] conecta los sistemas de gestión de mantenimiento (CMMS) con el proceso RCM de diseño de planes de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM) usando técnicas de conocimiento (KBS), de forma que se usan los datos operacionales ofrecidos por el sistema de gestión, realimentando el sistema de diseño, para optimización continua.

2.3. ESTADO DEL ARTE DE LA DEFINICIÓN ESTRATÉGICA

En la investigación bibliográfica enfocada al objetivo del módulo M1, definición estratégica, se ha basado en estudios con una metodología enfocada a la combinación de técnicas BSC y AHP.

En este marco, cabe destacar el estudio de Theriou [Theriou et al., 2004] en el que desarrolla un marco que define vínculos cuantitativos entre los criterios de desempeño y la planificación estratégica en las empresas.

Otros trabajos como el de Huang [Huang et al., 2011] se integran medidas financieras con indicadores clave en una empresa biofarmacéutica; mientras que el estudio de Lee [Lee et al., 2008] construye un enfoque basado en proceso analítico jerárquico y cuadro de mando integral para evaluar un departamento de tecnología de la información en la industria manufacturera.

Otro ejemplo se puede encontrar en el trabajo de Wu [Wu et al., 2009] que usan ambas herramientas para la evaluación del desempeño bancario, o en el estudio de Yüksel y Dagdeviren [Yüksel y Dagdeviren, 2010] que analizan el nivel de rendimiento de una empresa en función de su visión y estrategias a través de un cuadro de mando integral y un proceso de red analítica. O trabajos como el de los autores Cho y Lee [Cho y Lee, 2011] que justifican la aplicabilidad de conceptos de Proceso Analítico Jerárquico Difuso (FAHP) y Cuadro de Mando Integral (BSC) en la evaluación y selección de procesos de negocio, promoviendo una guía sistematizada en el proceso de toma de decisiones mediante una aplicación web desarrollada ex profeso.

No obstante, si bien existe en la literatura científica abundantes trabajos con ventajas en la integración de ambas metodologías Proceso Analítico Jerárquico (AHP) difuso y Cuadro de Mando Integral (BSC), el trabajo de Galankashi [Galankashi et al., 2016], evidencia que se mejora sustancialmente la evaluación si se definen métricas específicas para cada aplicación industrial, como el caso de selección del mejor proveedor en la industria automovilística. Con el mismo enfoque, el trabajo de Modak [Modak et al., 2019] justifica la mejor decisión de negocio, a largo y corto plazo, para integrar qué tipo de contratación (interna, subcontratación o alianza estratégica) se debe seleccionar en la industria minera de India, empleando Proceso Analítico Jerárquico en Red (ANP) y Cuadro de Mando Integral (BSC).

2.4. ESTADO DEL ARTE DE LA DEFINICIÓN TÁCTICA

Se han desarrollado modelos para la toma de decisiones empresariales o en la ingeniería, debido a la incertidumbre en las condiciones de la demanda y la evolución tecnológica. En el caso de las empresas, es posible encontrar enfoques estratégicos como los de Wollmann y Steiner [Wollmann y Steiner, 2017] y operacionales como los de Calvo et al. [Calvo et al., 2007] o algunos particularmente más dedicados a los proveedores como el trabajo de Mahdilo et al. [Mahdilo et al., 2012]. En el ámbito ingenieril, se pueden encontrar casos en la bibliografía, sobre condiciones de fabricación [Madic et al., 2016], diseño de producto [Zavadskas et al., 2016] o aspectos relativos a la ingeniería civil [Antucheviciene et al., 2015].

El contexto de mercado actual, caracterizado por plazos de entrega en continua reducción, y respuestas cada vez más inmediatas ante pedidos, considerando que la calidad y el tiempo afectan a la complejidad y a la flexibilidad del sistema, como desarrolla Calvo en su trabajo [Calvo et al., 2008], y teniendo en cuenta que la capacidad de las máquinas está limitada, lleva a contemplar como áreas productivas estratégicas de fábrica aquellas con cuellos de botella identificados. Siendo esta capacidad un valor invariante, se trata de mantener la disponibilidad máxima de las máquinas que componen un área productiva estratégica. Más aún, si en este contexto, se atiende a una producción continua, donde el tiempo no producido causado por avería es irrecuperable, como ocurre con la fabricación de papel.

Otra característica del contexto de mercado actual es la amplia gama de productos personalizados, dimanando en un paradigma cada vez más flexible de fabricación, imprimiendo a las máquinas productivas mayor exigencia y por lo tanto mayor nivel de fiabilidad. Dado que la fiabilidad es un concepto más operativo involucrando a equipos, o partes de máquinas, se ha introducido una metodología intermedia entre la estratégica y la operativa, para el área productiva identificada como estratégica como resultado del módulo M1 anterior, posibilite la extracción de conocimiento y predicción

los indicadores de disponibilidad y mantenibilidad de la misma. De este modo se establece una definición táctica en la toma de decisiones del departamento de mantenimiento.

En el campo de mantenimiento, cuando la toma de decisiones está relacionada con estrategias o políticas a largo plazo, las consideraciones de incertidumbre difusa se consideran convenientes. Así, se establece en la revisión bibliográfica, el trabajo de Mardani [Mardani et al., 2015] sobre técnicas de toma de decisiones multi-criterio difusas. Encontrando que en entornos de mantenimiento se utiliza el enfoque difuso en el marco estratégico a largo plazo como, por ejemplo, en la selección de la estrategia de mantenimiento de Bashiri [Bashiri et al., 2011], Fouladgar [Fouladgar et al., 2012], Wang [Wang et al., 2007] o en la política de mantenimiento de Ilangkumaran y Kumanan [Ilangkumaran y Kumanan, 2009]. Esto podría ser extensible a proyectos conforme establecen Yu [Yu et al., 2015] y Valipour [Valipour et al., 2016] o en entornos de ingeniería civil para Cheng [Cheng et al., 2015] donde hay más incertidumbre debido a las diferentes condiciones para cada evento. Sin embargo, en entornos industriales y con producción continua, como la fabricación de papel, donde las mismas máquinas se utilizan en la fabricación a pesar de la variedad del producto, los riesgos en las predicciones son menores.

La integración del Análisis de Componentes Principales (PCA) y las técnicas de Aprendizaje Automático o Machine Learning (ML) pueden facilitar la toma de decisiones en estos entornos. Trabajos como Abdi y Williams [Abdi y Williams, 2010] justifican el Análisis de Componentes Principales (PCA) como un método muy eficaz para encontrar aquellos atributos más influyentes que expliquen la mayor variación de un conjunto de datos, caracterizados por muchas variables explicativas sobre un gran número de registros. Este algoritmo es usado ampliamente en bibliografía, en particular Li [Li et al., 2014] lo aplica para mantenimiento predictivo como método de reducción de dimensiones.

Según Alpaydin [Alpaydin, 2004], el Aprendizaje Automático (ML) es una rama de la inteligencia artificial cuyo objetivo es automatizar de forma programática el proceso de aprendizaje en una computadora, del mismo modo que aprenden humanos y animales de forma natural, mediante experiencia. Los algoritmos de Aprendizaje Automático (ML) emplean directamente los datos sin establecer previamente una ecuación como modelo, además, estos algoritmos mejoran su eficacia con el número de datos usados como ejemplos durante el aprendizaje. El Aprendizaje Automático (ML) encuentra patrones naturales en los datos y ayudan a tomar mejores decisiones y establecer predicciones. Debido a su versatilidad, el Aprendizaje Automático (ML) se ha usado en muchos campos, incluida la construcción según Naganathan [Naganathan et al., 2016].

Sin embargo, el enfoque de combinar ambas técnicas, Análisis de Componentes Principales (PCA) y Aprendizaje Automático (ML), no es habitual encontrarlo en la bibliografía, la mayoría son trabajos con aplicación de mantenimiento predictivo; como el trabajo de Heinrich [Heinrich et al., 2020] aplicando ambas técnicas para monitorizar y programar intervenciones preventivas de limpieza en módulos fotovoltaicos en aras de aumentar el rendimiento energético evitando pérdidas por suciedad. Análogamente Oluwasegun y Jung [Oluwasegun y Jung, 2020] desarrolló un modelo de pronóstico de fallos aplicando Aprendizaje Automático (ML) a un perfil de corriente de una bobina de accionamiento de barras de control de un reactor, si bien, como a priori se desconoce el patrón de fallo, éste se obtiene desarrollando un Análisis de Componentes Principales (PCA).

La agrupación de datos facilitada por Análisis de Componentes Principales (PCA) permite una mejor interpretación de sistemas complejos tales como aquellos donde se aplica Aprendizaje Automático (ML); esta interpretabilidad es considerada una característica deseable en los métodos de Aprendizaje Automático (ML) para Vellido [Vellido et al., 2012]. En la definición táctica, se combinan las técnicas Análisis de Componentes Principales (PCA) y Aprendizaje Automático (ML), dentro del sistema asistido, con el objetivo de posibilitar la predicción de la evolución de indicadores claves de mantenimiento.

2.5. ESTADO DEL ARTE DE LA DEFINICIÓN OPERATIVA

El objeto de este tercer módulo, con alcance operativo, persigue compilar y explotar el conocimiento histórico en cuanto a fallos y averías adquirido en la planta industrial a través del capital intelectual humano procedente de grupos de trabajo conformados al efecto. Una vez adquirido dicho conocimiento disponible en formato de fichas de trabajo según la metodología de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM), se implementa, mediante algoritmos de Razonamiento Basado en Casos (CBR), este conocimiento en una aplicación Java [Oracle, 2019] desarrollada al efecto para conducir el proceso completo de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM) accediendo a una base de casos similares que podrá ser adaptada.

Integrando esta nueva funcionalidad en el sistema completo de diseño de planes de mantenimiento conforme a las partes primera (estratégica) y segunda (táctica) se consigue alinear la última parte (operativa) con los dos objetivos anteriores aumentando la eficacia del plan decisional de la empresa industrial. Esta nueva extensión permite controlar la función mantenimiento de una planta industrial, a corto plazo, con horizonte semanal, diseñar un plan de mantenimiento ajustado a la realidad de la planta en el contexto operativo actualizado, que puede diferir mucho sobre el inicialmente proyectado o sobre otro anterior inmediato debido a los nuevos requisitos productivos aplicados a los equipos como consecuencia de adaptarse a la demanda cambiante de mercado, según observado en trabajos de Sardana [Sardana et al., 2016], Lazarova-Molnar y Mohamed [Lazarova-Molnar y Mohamed, 2019]. Además de posibilitar mayor integración de funcionalidad y conocimiento en equipos de fabricación basados en la nube, como sistemas ciber-físicos, dentro del paradigma de la industria 4.0 según los trabajos de Lu y Xu [Lu y Xu, 2019] y mejorar los sistemas de fabricación reconfigurables según justifica Li [Li et al., 2019].

Como discusión sobre la integración de las metodologías de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM) y Razonamiento Basado en Casos (CBR), cabe destacar

como antecedentes, otro trabajo realizado por Cheng [Cheng et al., 2008] con un sistema inteligente denominado IRCMA de planteamiento similar, aunque con gran diferencia de enfoque respecto a este trabajo en lo concerniente al tratamiento del proceso RCM. Fundamentalmente la gran diferencia, trata de aplicar el paradigma de Razonamiento Basado en Casos (CBR) sólo en la parte de Análisis de Modos de Fallos, Efectos y Criticidades (AMFEC) de la metodología de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM), posibilitando recuperar casos para esta parte que es más ardua de documentar y consume más tiempo dedicado por parte de expertos según considera Candea [Candea et al., 2014], para posteriormente, aplicar el flujograma decisional del proceso RCM, en el nuevo contexto del problema mediante consulta.

De esta forma se consigue agrupar, por un lado, las ventajas de la metodología de Razonamiento Basado en Casos (CBR), recuperando casos similares de Análisis de Modos de Fallos, Efectos y Criticidades (AMFEC), consiguiendo un ahorro sustancial de tiempo dedicado de experto y maximizar las capacidades humanas en cuanto a recordatorio de casos similares cuando se disponen de una abundante base de casos y por otro lado, aplicar correctamente los criterios de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM) en cuanto a la clasificación de la política de mantenimiento a llevar a cabo y no mediante la recuperación de un caso similar CBR.

Con esto se pretende usar sólo la recuperación de casos en la parte de Análisis de Modos de Fallos, Efectos y Criticidades (AMFEC) del método, muy relacionada con el fallo funcional y su causa raíz, hecho que depende más del tipo de equipo, pero no en la política de mantenimiento que depende más del contexto operativo donde trabaje dicho equipo, empleando para ello los criterios de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM) establecidos por Moubray [Moubray, 1997].

Es destacable el hecho de encontrar muy poca bibliografía en la que se integren ambas metodologías RCM y CBR como así lo indica Kobbacy [Kobbacy, 2012], evidenciando exclusivamente la referencia de IRCMA ya citada [Cheng et al., 2008] hasta 2012. En este sentido una búsqueda bibliográfica actual pone de manifiesto que

tampoco existen más publicaciones relacionadas hasta la fecha. En el trabajo de Denisov [Denisov et al., 2013] se ha realizado un sistema de Razonamiento Basado en Casos (CBR) con ontologías para organizar el mantenimiento de activos físicos viales, si bien emplean el proceso de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM), no está propiamente integrado en su modelo, más bien usan el número de priorización de riesgo de previos RCM. No obstante, se aclara el hecho que realizar CBR basados en ontologías requiere más esfuerzo de tiempo previo dedicado para implementar en un modelo mixto CBR-RCM, motivo por el cual en esta Tesis Doctoral no se ha optado usar Razonamiento Basado en Casos (CBR) usando ontologías, además presenta ciertas limitaciones como evidencia Shan [Shan et al., 2019] en su trabajo de aplicación de CBR usando ontologías en una máquina de control numérico, resultando que sólo es válido para máquinas similares que puedan ser representadas con esa ontología además del alto tiempo dedicado para representar el dominio del conocimiento de la máquina en la metodología. En cuanto el uso de Razonamiento Basado en Casos (CBR) integrado con el Análisis de Modos de Fallos, Efectos y Criticidades (AMFEC) ha sido usado exitosamente para fines de diagnóstico, según el trabajo de Chebel-Morello [Chebel-Morello et al., 2012].

2.6. CONSIDERACIONES FINALES

En el estado del arte presentado, se ha consultado bibliografía específica donde para cada definición, se considera una serie de enfoques metodológicos y herramientas agrupadas con criterios no sólo técnicos, si no también económicos que respondan a las pretensiones marcadas por la alineación de objetivos de esta Tesis Doctoral, conforme a los tres niveles de alcance de los mismos.

CAPÍTULO 3:

BASES DEL SISTEMA ASISTIDO PARA LA DECISIÓN ESTRATÉGICA Y PLANIFICACIÓN

3.1. Introducción al capítulo _____	23
3.2. Estructura del sistema asistido para la decisión estratégica y planificación	23
3.3. Objetivo de la definición estratégica ante el problema de los activos en un contexto de mercado globalizado _____	28
3.4. Objetivo de la definición táctica ante el problema de la identificación y comportamiento de los equipos críticos _____	29
3.4. Objetivo de la definición operativa ante el problema de diseño sobre las acciones de mantenimiento _____	31
3.6. Consideraciones finales _____	33

CAPÍTULO 3: BASES DEL SISTEMA ASISTIDO PARA LA DECISIÓN ESTRATÉGICA Y PLANIFICACIÓN

3.1. INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO

En el presente capítulo se exponen las bases que definirán tanto la estructura del sistema asistido para la decisión estratégica y la planificación de procesos de mantenimiento en plantas industriales, como los distintos objetivos perseguidos y la relación entre ellos para conseguir alinearlos con la finalidad última de aumentar la eficacia productiva de las plantas.

3.2. ESTRUCTURA DEL SISTEMA ASISTIDO PARA LA DECISIÓN ESTRATÉGICA Y PLANIFICACIÓN

El objetivo principal de la presente Tesis Doctoral es la propuesta de un sistema que asista a un experto en la toma de decisiones para el diseño de planes de mantenimiento personalizado a una planta productiva, partiendo de la alineación de los objetivos estratégicos de la empresa definidos por responsables máximos de la planta, involucrando a responsables de mantenimiento en cuanto a la toma de decisiones tácticas, hacia objetivos operativos de mantenimiento definidos por grupos de trabajo formados por mandos intermedios y operadores de mantenimiento y producción conjuntamente. Como resultado se ha obtenido un programa de mantenimiento detallado que atienda las necesidades reales de la planta, conforme a sus recursos y alineado con los objetivos de negocio. Este programa debe implementarse en el sistema de gestión de mantenimiento de la planta para controlar la ejecución del mismo.

Se ha partido de un marco para el desarrollo del Sistema Asistido de Apoyo a la Decisión y Planificación de Mantenimiento, en adelante MDSS (Maintenance Decision

Support System), que integra las metodologías de cuadro de mando integral, en adelante BSC (Balanced ScoreCard), que alinea los objetivos de mantenimiento con aquellos hitos estratégicos de la empresa junto con los de mantenimiento centrado en fiabilidad, en adelante RCM (Reliability Centered Maintenance) para mejorar el rendimiento operativo de mantenimiento. Añadiendo técnicas basadas en conocimiento, en adelante KBS (Knowledge Based Systems), el sistema propuesto asiste a los expertos en la toma de decisiones de mantenimiento, suponiendo menor tiempo dedicado y mayor precisión a tenor de las consideraciones de los autores Lee y Wang [Lee y Shin, 2019], [Wang et al., 2020]. El sistema propuesto se refina conforme a esquemas de mejora continua y es susceptible de una optimización robusta como evidencian los autores Moret, Zhao y Plaza en sus estudios [Moret et al. 2020], [Zhao y You, 2019], [Plaza et al., 2019]. Para alcanzar el objetivo general perseguido se ha propuesto un marco para desarrollar un sistema de apoyo a la decisión, con esquema modular y de mejora continua, tal como se muestra en la Figura 3.1, de acuerdo con el concepto personalizado de mantenimiento establecido dado por Waeyenbergh y Pintelon [Waeyenbergh y Pintelon, 2002].

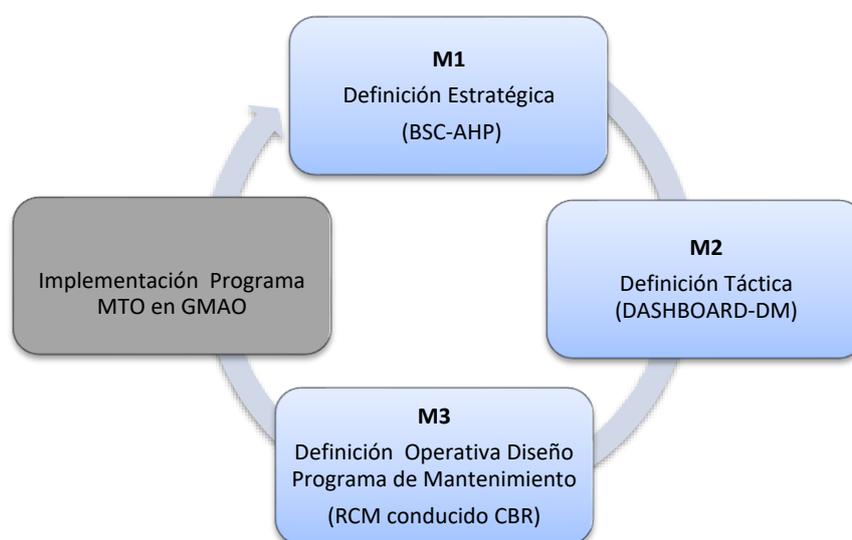


Figura 3.1. Estructura modular del marco propuesto: sistema asistido para la decisión de mantenimiento

El enfoque presentado indica, para cada módulo, una combinación de metodologías y técnicas empleadas para construir el sistema de apoyo a la decisión de mantenimiento. El sistema propuesto se ha presentado desde tres enfoques distintos: usuario, interrelación de sistemas y objetivos.

Desde el punto de vista de usuario, se ha tratado de desarrollar un sistema que comunique con un sistema GMAO (Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador), también denominado por su acrónimo en inglés CMMS (Computerized Maintenance Management System), e interactúe con los distintos grupos de trabajo y con distinto nivel de responsabilidad y visión de la planta –responsables máximos de planta, responsables de mantenimiento, y grupo RCM-. De este modo, se ha conseguido capturar la información de contexto y agregar los objetivos especificados para planificar el mantenimiento de una planta industrial. Como resultado del proceso, se ha obtenido un programa detallado de mantenimiento definido en el tiempo, en su nivel más operativo para implementarse en el sistema GMAO, ver Figura 3.2, siempre validado por el usuario al que asiste, normalmente una persona encargada o gestor de mantenimiento, para proceder a su ejecución.

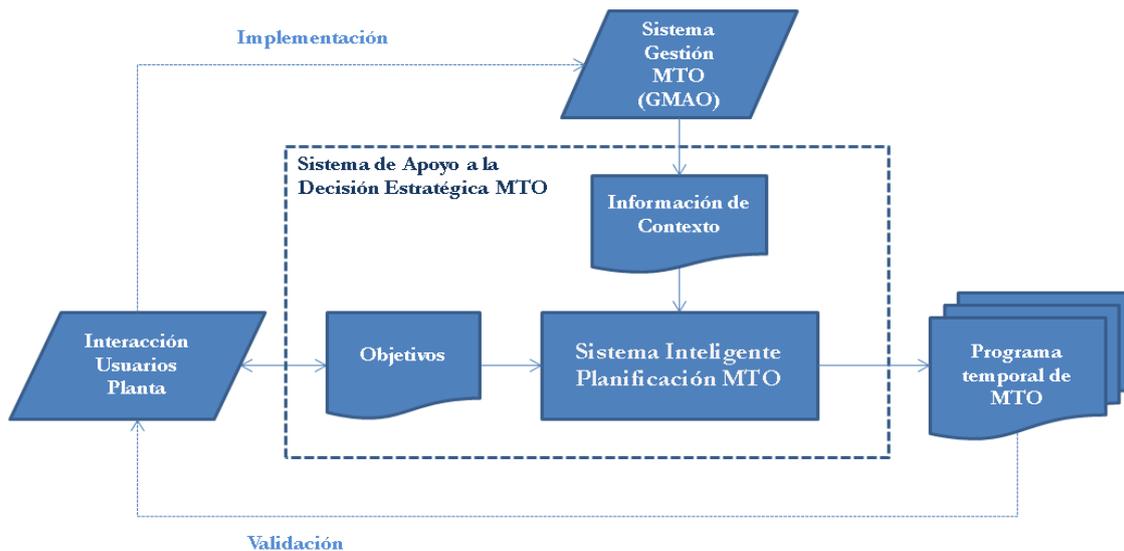


Figura 3.2. Sistema de apoyo a la decisión de mantenimiento, punto de vista de usuario

Desde el punto de vista de arquitectura del sistema asistido objeto de la presente Tesis Doctoral, se muestra como un sistema inteligente de planificación de mantenimiento representado en la Figura 3.3. En el sistema de apoyo a la decisión se evidencia la interrelación entre los distintos usuarios de planta y el sistema de GMAO, el sistema sólo actúa como asistente no intrusivo, ya que toma datos del sistema de gestión y la implementación se efectúa a través de gestor de mantenimiento.

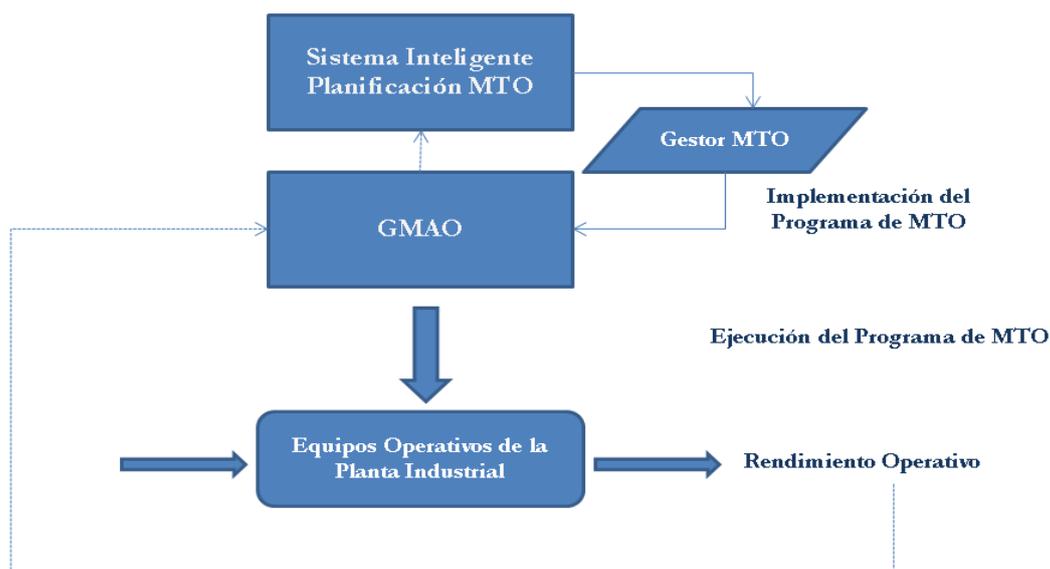


Figura 3.3. Arquitectura de los sistemas de apoyo a la decisión y gestión de mantenimiento

Desde el punto de vista de los objetivos, se trata de un sistema que capte los objetivos estratégicos (largo plazo) de la empresa y los objetivos de gestión táctica (medio plazo) del personal responsable de mantenimiento y los traduzca a objetivos operativos (corto plazo) de mantenimiento. Para la traducción de objetivos de la empresa, se ha usado el método del Proceso de Jerarquía Analítica, en adelante AHP (Analytic Hierarchy Process), de forma que los responsables máximos de planta puedan establecer que áreas serán las estratégicas para la empresa. No obstante, los responsables de mantenimiento podrán de igual modo mediante el uso de BSC-proceso interno establecer las acciones correctoras en aquellos equipos (definidos como estratégicos), posteriormente se ha aplicado el método RCM conducido por el sistema inteligente, asistiendo al grupo RCM, para aplicar las acciones de mantenimiento, en función del tiempo y asignando los recursos necesarios, tal como se muestra en la Figura 3.4.

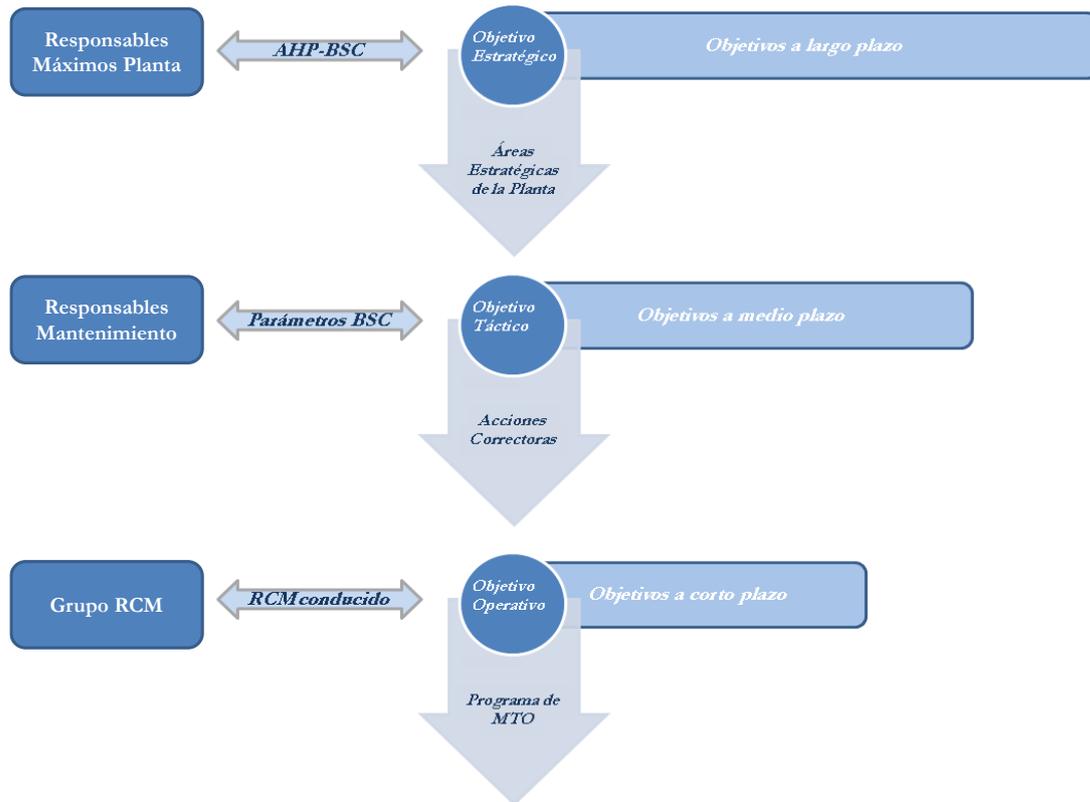


Figura 3.4. Relación de objetivos a distintos niveles y métodos empleados

Partiendo de que el sistema asistido se ha definido conforme a los alcances estratégico, táctico y operativo, para acometer los tres objetivos de forma asíncrona, a lo largo de la presente Tesis Doctoral se describen los módulos que engloban las tres definiciones, para conseguir el objetivo general de este trabajo. Esto se evidencia en la Figura 3.1, donde los módulos se han aplicado de forma secuencial, siendo los resultados, información de salida de uno, la información de entrada del siguiente.

3.3. OBJETIVO DE LA DEFINICIÓN ESTRATÉGICA ANTE EL PROBLEMA DE LOS ACTIVOS EN UN CONTEXTO DE MERCADO GLOBALIZADO

Actualmente, la competencia de empresas sometidas a mercado globalizado se caracteriza por una alta tasa de cambio en innovación tecnológica emergente y

demandas de mercado cambiante; en este escenario, los modelos flexibles pueden ayudar a la toma de decisiones [Calvo et al., 2007]. Cuando se aúnan cada vez ciclos de vida más cortos de productos, supone poner en situación de estrés los equipos productivos. Esta variabilidad lleva a considerar el propio mantenimiento como clave para asegurar la función requerida, bajos costes de ciclo de vida y las operaciones en los equipos productivos. En esta situación de estrés, el conocimiento técnico que se tenga de los equipos para una acertada toma de decisiones en el ámbito de mantenimiento se convierte en crucial, siendo necesario considerar multitud de variables y parámetros que, en un sistema industrial, que se torna complejo, dedicando mucho tiempo de análisis para realizar una toma de decisión adecuada.

El objetivo del módulo denominado M1, de la Figura 3.1, como parte inicial del sistema propuesto, es asistir al diseño y construcción de programas de mejora de mantenimiento, traduciendo los objetivos estratégicos, integrando el método estratégico del cuadro de mando integral (BSC) con la técnica de apoyo a la decisión, y el proceso de jerarquía analítica (AHP). Por ende, el objetivo del módulo M1 será la definición estratégica, permitiendo al decisor identificar las áreas más estratégicas para el negocio de la organización, siguiendo el enfoque de BSC, con una elección racional y documentada. Como resultado del módulo, se ha establecido una prelación de las áreas productivas donde deben focalizarse las primeras acciones de mantenimiento.

3.4. OBJETIVO DE LA DEFINICIÓN TÁCTICA ANTE EL PROBLEMA DE IDENTIFICACIÓN Y COMPORTAMIENTO DE EQUIPOS CRÍTICOS

En un contexto de mercado como el actual, en el que los plazos de entrega se reducen continuamente, la respuesta productiva de la fábrica ha de ser cada vez más rápida; teniendo en cuenta que la capacidad de las máquinas está limitada, se consideran estratégicas aquellas áreas productivas de la fábrica con cuellos de botella

identificados. Siendo esta capacidad un valor invariante, se trata de mantener la disponibilidad máxima de las máquinas que componen un área productiva estratégica. Más aún, si en este contexto, se atiende a una producción continua, en el que el tiempo no producido debido a una avería es irrecuperable, como ocurre en el proceso de fabricación de papel. Otra característica de la coyuntura del mercado, supone una oferta más amplia en la gama de productos, lo que conlleva al contexto de fabricación a modificar de una producción en masa a una fabricación flexible, y es en este último caso, la versatilidad es lo que imprime a las máquinas mayor desgaste y fatiga por su alta tasa de cambio en la configuración, repercutiendo en posibles pérdidas de fiabilidad. Esto supone extremar aún más las medidas en cuanto a predicción de averías y anticipación a fallos. En este sentido, la ingeniería de mantenimiento predictivo ha desarrollado y perfeccionado tecnologías para la monitorización y predicción de fallos antes de llegar a las roturas [Olivencia et al., 2015], [Trappey et al., 2015], [Martínez-Martínez et al., 2015]. Si bien, el enfoque es más operativo y requiere de recursos e inversiones que siguiendo el esquema de Moubray [Moubray, 1997], no se pueden establecer en toda un área productiva estratégica, sino en ciertos equipos, instalaciones o partes de máquinas, considerados críticos. Con el fin de ofrecer respuesta a esta problemática, se ha considerado introducir una metodología, para un área productiva señalada como estratégica, que ofrezca extracción de conocimiento y predicción de indicadores de su disponibilidad, de modo que el departamento de mantenimiento pueda ofrecer una respuesta en tiempo, con mínimos recursos para mantener la fiabilidad exigida.

Para abordar este enfoque táctico, el módulo tiene como objetivo proporcionar un mayor conocimiento y predicción, proyectando el comportamiento de fiabilidad en un futuro a medio plazo (horizonte anual tomado en intervalos mensuales), integrando esta nueva funcionalidad en los clásicos cuadros de mando BSC y permitiendo extender su función de medición de la situación actual hacia una nueva aptitud: predecir su evolución basada en datos históricos [Palocsay et al., 2010]. Para este objetivo se han

utilizado técnicas como Análisis de Componentes Principales, en adelante PCA (Principal Component Analysis) y Aprendizaje Automático, en adelante ML (Machine Learning).

3.5. OBJETIVO DE LA DEFINICIÓN OPERATIVA ANTE EL PROBLEMA DE DISEÑO SOBRE LAS ACCIONES DE MANTENIMIENTO

La incertidumbre de la demanda ha llevado a los sistemas de producción a ser cada día más complejos; esto puede afectar a la disponibilidad de las máquinas y por tanto a su mantenimiento, por lo que es necesaria una gestión adecuada de la información que facilite la toma de decisiones. Esta Tesis Doctoral presenta un sistema para la toma de decisiones relativas al diseño de planes de mantenimiento personalizados, dentro de una planta productiva, cuyo objetivo general es la propuesta de un sistema que asista a un experto en la toma de decisiones para el diseño de planes de mantenimiento personalizado a una planta productiva, partiendo de la alineación de los objetivos estratégicos de la empresa, aquellos tácticos y operativos de mantenimiento, conforme el concepto personalizado.

Como antecedentes, los datos de salida del módulo estratégico M1 anterior ofrece un área productiva de la planta donde aplicar las mejoras [Rodríguez-Padial et al., 2015], esta área será tomada como punto de partida del módulo táctico denominado M2 en el que se analizará pormenorizadamente, según secciones de la misma, conforme a su árbol de máquinas, reduciendo el nivel jerárquico. Esta sección finalmente será objeto de análisis del presente módulo y de nuevo esta sección será desglosada según el árbol de máquinas para ser analizada desde el punto de vista de fiabilidad según el trabajo de Rodríguez-Padial [Rodríguez-Padial et al., 2017a], [Rodríguez-Padial et al., 2017b]. Si bien el presente módulo M3 operativo, en síntesis, tratará de resolver un problema de fiabilidad planteado mediante la metodología de contrastado éxito RCM y conducida por algoritmos de Razonamiento Basado en Casos, en adelante CBR (Case-based Reasoning), para ofrecer una solución de mantenimiento

optimizado e idóneo al caso planteado. Esta solución de mantenimiento tendrá un formato de tipo o clase de mantenimiento a aplicar, su frecuencia e instrucciones específicas a desarrollar en la futura orden de trabajo que se programará en el GMAO.

El objetivo del módulo denominado M3, como parte final del sistema propuesto, es asistir al diseño de planes personalizados de mantenimiento centrados en fiabilidad de forma conductiva, esto es, guiar de forma idónea según metodología RCM al experto en mantenimiento, de forma que se minimiza el error humano y se asegura un adecuado nivel de excelencia en la metodología aplicada. Por otro lado, se reduce drásticamente el tiempo dedicado del experto en mantenimiento en trabajos de recuperación de casos, análisis y adaptación de los mismos al nuevo caso o problema de fiabilidad presentado, ya que se realiza de forma automática mediante una aplicación software desarrollada al efecto. Una ventaja fundamental reside en el hecho de disponer de una gran cantidad de casos históricos y el experto sólo considerará los k-casos más similares, kNN de su acrónimo en inglés¹, siendo k el número de casos similares que se mostrarán por la aplicación. Todo esto traduce los objetivos operativos integrando metodología de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM) con la metodología de Razonamiento Basado en Casos (CBR). Por tanto, el objetivo del módulo M3 es la definición operativa, permitiendo al experto o líder del grupo RCM ser conducido eficientemente en la metodología RCM, con gran ahorro de tiempo dedicado, en concreto sobre la parte del método donde se analizan los modos de fallo, efectos y criticidades, FMECA de su acrónimo en inglés², para el negocio de la organización.

Como resultado del módulo, se ha establecido una solución como acción de mantenimiento o tarea a aplicar como respuesta a un problema de fiabilidad detectado sobre un equipo de una sección elegida del módulo anterior. Esta solución, realizada de forma iterada sobre la sección objeto de análisis, permite crear un plan de

¹ NN: Nearest Neighbour ó vecino más cercano

² También conocido como AMFEC por su acrónimo en español

mantenimiento completo sobre la misma, para ser programado en la gestión de mantenimiento asistido por ordenador. Cabe destacar que esta metodología se basa en un esquema de mejora continua, lo que permite ser aplicado frecuentemente según lanzamiento del sistema completo de los módulos anteriores M1 y M2 o bien de forma independiente cuando se detecte una pérdida de fiabilidad.

3.6. CONSIDERACIONES FINALES

La meta global perseguida es la alineación de objetivos estratégicos de los tres módulos con enfoques y alcances distintos, si bien es complejo alinear los de alto nivel orientados al rendimiento del negocio industrial y marcado por la dirección empresarial, con aquellos considerados tácticos determinados por indicadores de índole técnica y dictaminados por los mandos intermedios. Esta alineación se complica aún más cuando además se deben compatibilizar con objetivos más operativos, caracterizados por problemas de gestión rutinaria donde se involucran operadores de planta que son los máximos conocedores de los pormenores de los problemas y averías diarias.

El enfoque de esta Tesis Doctoral se ha basado en engranar convenientemente una serie de metodologías y tecnologías más avanzadas para conseguir la citada alineación, mediante un sistema asistido que conduzca a un experto o panel de expertos en la consecución efectiva de la estrategia marcada por la dirección empresarial, plasmando el resultado en acciones de mantenimiento muy concretas y determinadas a resolver los problemas particulares y reales que coexisten en los centros productivos industriales. En este sentido, se ha consultado la bibliografía para evaluar el estado del arte con este enfoque y las herramientas empleadas.

CAPÍTULO 4:

ESTRUCTURA METODOLÓGICA DEL SISTEMA ASISTIDO

4.1. Introducción al capítulo _____	37
4.2. Estructura y metodología del sistema asistido para la definición estratégica__	37
4.2.1. Panel experto y método de consenso (Delphi de dos etapas) _____	39
4.2.2. Modelo estratégico Cuadro de Mando Integral-Proceso Analítico Jerárquico_____	41
4.3. Estructura y metodología del sistema asistido para la definición táctica_____	42
4.3.1. Fase exploratoria de datos _____	45
4.3.2. Fase de análisis mediante aprendizaje automático_____	49
4.4. Estructura y metodología del sistema asistido para la definición operativa ____	55
4.4.1. Metodología del Mantenimiento Centrado en Fiabilidad _____	55
4.4.2. Metodología del Razonamiento Basado en Casos _____	59
4.4.2.1. Implementación de la metodología del Razonamiento Basado en Casos: JCOLIBRI _____	63
4.5. Consideraciones finales _____	66

CAPÍTULO 4: ESTRUCTURA METODOLÓGICA DEL SISTEMA ASISTIDO

4.1. INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO

En el presente capítulo se definirá a detalle la estructura de las metodologías empleadas conforme a los distintos métodos y herramientas tecnológicas integradas en el sistema asistido global y aplicados secuencial y modularmente, siguiendo los tres niveles de alcance: estratégico, táctico y operativo, según el esquema general mostrado en la Figura 3.1.

4.2. ESTRUCTURA Y METODOLOGÍA DEL SISTEMA ASISTIDO PARA LA DEFINICIÓN ESTRATÉGICA

Para conseguir el objetivo estratégico, se vincularán los Indicadores Clave de Rendimiento (KPI) con las metas y objetivos de la organización, en concreto se usará la herramienta Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para establecer varios Indicadores Clave de Rendimiento (KPI) como criterios de medida de rendimiento conforme a la metodología de Cuadro de Mando Integral (BSC). El Proceso Analítico Jerárquico (AHP) transforma las comparaciones paritarias en un modelo computacional, y por lo tanto pueden ser implementados en aplicaciones informáticas personalizadas o bien disponibles en paquetes informáticos dedicados a ello como Expert Choice® [Expert Choice Inc., 2015]. En la Figura 4.1, se detalla el modelo BSC-AHP propuesto para el módulo M1.

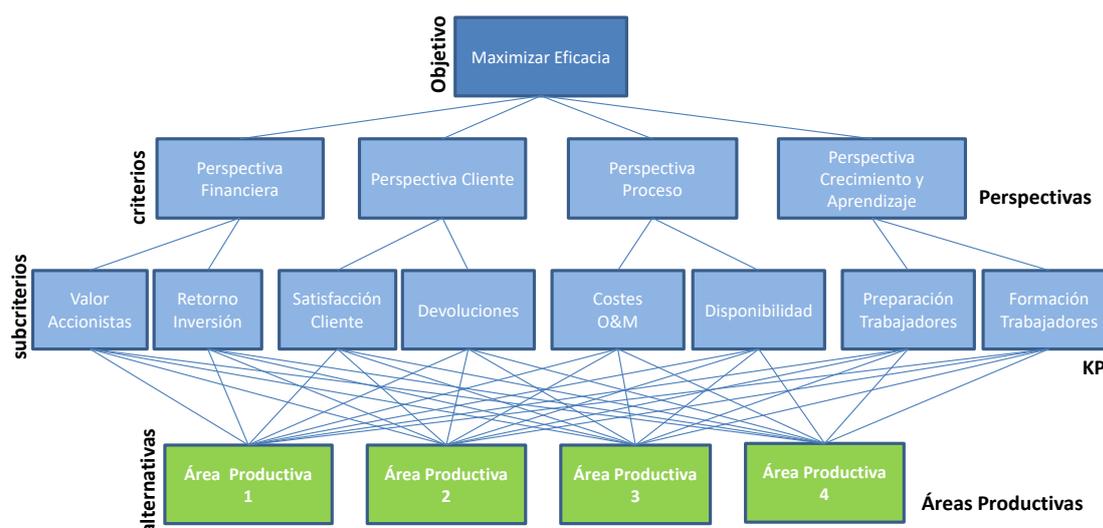


Figura 4.1. Modelo de decisión jerárquica de cuadro de mando BSC-AHP propuesto para el módulo M1

La estructura jerárquica construida de esta forma vincula el objetivo de seleccionar el área a maximizar la eficacia del negocio industrial entre las distintas alternativas como áreas estratégicas de la misma, en este caso, se han representado cuatro áreas seleccionadas. Se puede observar que el objetivo es maximizar la eficacia entendiendo ésta como el rendimiento del negocio industrial, los criterios tomados se cuantifican como Indicadores Clave de Rendimiento (KPI) y son agrupados en objetivos estratégicos dentro del enfoque clásico de la perspectiva de Cuadro de Mando Integral (BSC). Los Indicadores Clave de Rendimiento (KPI) establecidos se aprecian en la Tabla 4.1.

El montaje del sistema de decisión Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para la estructura presentada como modelo (Figura 4.1.) se lleva a cabo en cuatro pasos:

1. Ponderación de los criterios (perspectivas)
2. Ponderación de los subcriterios (KPI)
3. Ponderación de alternativas(áreas) para cada subcriterio (KPI)
4. Obtención del vector de priorización \bar{V}_P de áreas (APi).

Cabe destacar que el vector de priorización de áreas será directo al obtenido en el paso 4, ya que el resultado es de mayor a menor la relación de áreas preferidas para maximizar su eficacia, motivo por el cual se seleccionará el área con mayor puntuación obtenida, pues será el área objeto de mejora del esquema y, por ende objeto de estudio del módulo 2 siguiente.

Tabla 4.1. Objetivos estratégicos e indicadores de rendimientos clave KPI

Perspectiva BSC	Objetivos estratégicos	KPI
Financiera	Valor de accionistas	EBITDA
	Retorno de la Inversión	ROI
Cliente	Satisfacción	Ratio de Clientes Satisfechos/Total Clientes
	Devoluciones	Ratio de Devoluciones/Ventas
Proceso	Costes O&M	Ratio costes operación y mantenimiento
	Disponibilidad	Variable temporal disponibilidad A(t), función de tiempos {MTBF, MTTR, UT}
Aprendizaje y crecimiento	Preparación de trabajadores	Medidas {Polivalencia, aptitud al puesto}
	Formación profesional	Titulación y Promoción interna

4.2.1. PANEL EXPERTO Y MÉTODO DE CONSENSO (DELPHI DE DOS ETAPAS)

El método Proceso Analítico Jerárquico (AHP) es multiagente, por lo que permite la evaluación de un grupo de expertos que puede integrarse en la toma de decisiones. En el presente modelo, se presenta un caso en estudio, donde en este particular el grupo está formado por cuatro expertos, que cubren el alcance de las cuatro perspectivas según se muestra en la Tabla 4.2. Esto implica realizar la misma encuesta facilitando un formulario a cada uno de los expertos agregando todas las puntuaciones y construyendo un vector propio formado por la suma geométrica de los componentes de cada uno de los expertos. Para gestionar cualquier discrepancia entre las

puntuaciones entre los expertos, se incorpora en el modelo BSC-AHP un método de consenso como el método Delphi propuesto por Dalkey y Helmer [Dalkey y Helmer, 1963]. Este método ha sido probado junto con el método AHP en varios estudios, trabajos de Astigarraga [Astigarraga, 2003], Kim [Kim et al., 2013], tratándose de un proceso iterativo basado en cuestionarios para lograr el consenso entre el panel de expertos. En el presente caso de estudio, el método Delphi es implementado en dos etapas en el trabajo de Astigarraga [Astigarraga, 2003]. Mientras que el método más ortodoxo considera realizarse en más de tres etapas sucesivas, repitiendo el envío de cuestionarios. Esta variante del método establece que el método puede limitarse a dos etapas sin afectar la calidad de los resultados, suponiendo una ventaja en el ahorro de tiempo invertido. El método Delphi consiste en dos etapas donde, en la primera etapa, se facilitan los cuestionarios al panel de expertos, se realiza un tratamiento estadístico sobre los mismos, mostrando la tendencia central (media) y evaluando la dispersión. En la segunda etapa, se proporcionan de nuevo los cuestionarios puntuados por cada experto, añadiendo y mostrando el valor central del grupo e indicándole si está de acuerdo con dicho valor medio, solo los expertos que no estén de acuerdo con el valor medio del grupo deben justificar su puntuación. Esta divergencia justificada sirve para desarrollar escenarios alternativos que enriquezcan el conocimiento según la calidad y competencia de los expertos. El Método Delphi asume que en la primera etapa existirá una dispersión entre los expertos y que esta se reducirá, facilitando el consenso, en la segunda etapa, analizando los puntos donde hay diferencias, destacando juicios divergentes, pero justificados. Además, dado que el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) usa un método matemático de combinación, los juicios individuales de cada experto (en este caso la media geométrica) no es estrictamente necesario un método de consenso, aunque sí se considerado idóneo para disminuir la dispersión y aproximar aún más el resultado esperado para cada experto.

Tabla 4.2. Panel de expertos, según categoría e implicación en la decisión estratégica

ID Experto	Categoría	Función objetivo
E ₁	Director de fábrica	Negocio industrial global y relación con accionistas
E ₂	Director de calidad	Centrado en el producto y satisfacción del cliente
E ₃	Director de producción	Centrado en el proceso de explotación y producción
E ₄	Director de mantenimiento	Centrada en funcionalidad de máquinas y equipos de proceso.

4.2.2. MODELO ESTRATÉGICO CUADRO DE MANDO INTEGRAL-PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO

El vector de priorización se calcula mediante el producto matricial de las áreas productivas matriciales basadas en Indicadores Clave de Rendimiento (KPI), con el vector de peso final \bar{V}_{KPI} . Dimensionalmente se obtiene el tamaño del vector de priorización 4×1 , donde cada componente $\bar{V}_p(A_{Pi})$ corresponde al valor total de prioridad para cada una de las áreas productivas A_{Pi} . El valor más alto corresponde al área productiva elegida para aplicar acciones de mantenimiento dirigidas a aumentar su eficiencia productiva. Como consecuencia de haber aplicado la metodología, se ha identificado un área prioritaria sobre la cual actuar, el área productiva 2, dicha área productiva está compuesta por las dos máquinas de fabricación de papel, M1 y M2, en la fábrica productiva. Este resultado y el modelo matemático completo BSC-AHP que se muestra en la Figura 4.2.

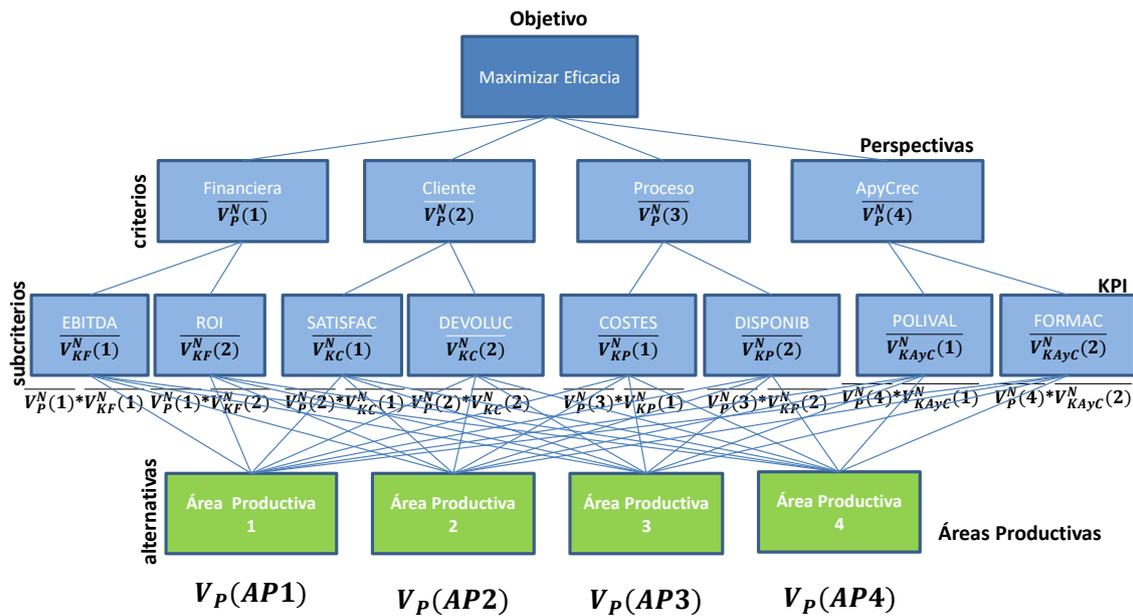


Figura 4.2. Modelo BSC-AHP del M1 para las 4 áreas productivas APi y vectores de priorización $\overline{V}_P(AP_i)$

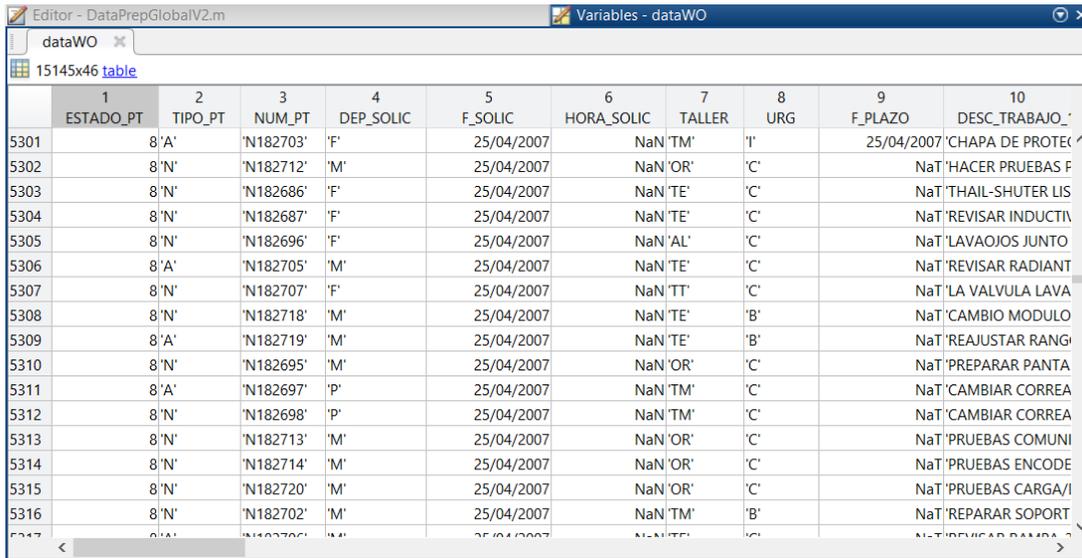
4.3. ESTRUCTURA Y METODOLOGÍA DEL SISTEMA ASISTIDO PARA LA DEFINICIÓN TÁCTICA

En el diseño de cuadro de mando personalizado propuesto, se integra una parte exploratoria de datos mediante el uso de algoritmos de Análisis de Componentes Principales, Principal Component Analysis (PCA), y otra parte de descubrimiento y predicción mediante Aprendizaje Automático, Machine Learning (ML), empleando el programa Matlab® [Matlab, 2019], donde específicamente se han usado algoritmos de Redes Neuronales, Artificiales, Artificial Neural Network (ANN). Los datos que han sido usados de partida para evaluar los resultados se han obtenido de registros de un área productiva, AP, compuesta por dos máquinas, codificadas en el programa de Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador (GMAO) como máquinas principales de fabricación de papel similares, denominadas M1 y M2. Los datos se han dividido en dos partes, una parte que será usada en la fase exploratoria, que reflejan las órdenes de trabajo de mantenimiento recibidas en el área productiva durante el período de un año. La otra parte, que será usada en la fase de análisis, donde se representan los valores de

producción y las respuestas de la máquina, como variables de eficacia y tiempos de fallos, igualmente considerando el período de un año. Debido al proceso de mejora continua que caracteriza a la industria de fabricación de papel, la influencia de la función mantenimiento sobre la eficacia productiva y sostenibilidad es más sensible que en otro tipo de plantas industriales como justifican los trabajos de Calvo y Domingo [Calvo y Domingo, 2013], [Calvo y Domingo, 2015], [Calvo y Domingo, 2017]. Por tanto, este estudio se centra en los indicadores de Eficacia Global de los Equipos, Overall Equipment Effectiveness (OEE), y el Tiempo Medio Hasta el Fallo, Mean Time To Failure (MTTF) [Domingo y Aguado, 2015].

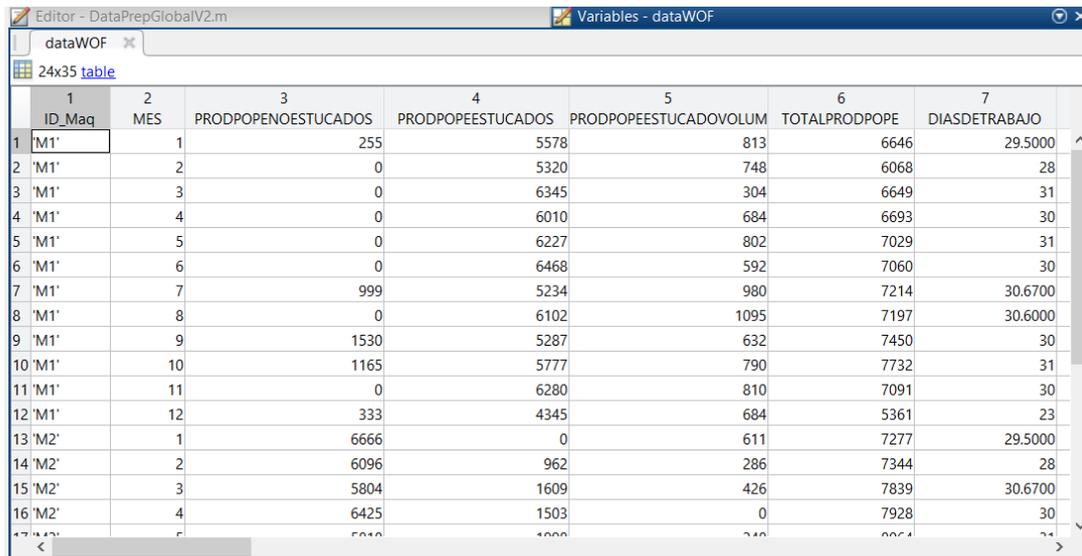
Se ha empleado el algoritmo de Análisis de Componentes Principales (PCA) en la fase exploratoria como un método muy eficaz para encontrar aquellos atributos más influyentes, que expliquen la mayor variación del conjunto de datos. En la fase de análisis mediante técnicas de Aprendizaje Automático (ML), se usan Redes Neuronales Artificiales (ANN) por su versatilidad como algoritmos para aprendizaje supervisado y no supervisado, y por su buen comportamiento frente a otras técnicas de Aprendizaje Automático (ML) usadas para predicción [Jiang et al., 2016]. En el aprendizaje no supervisado, se usan dos tipos de algoritmos para extraer conocimiento de la estructura de datos mediante clustering; por un lado, se emplea clustering jerárquico y por otro Redes Neuronales de Mapas Auto Organizados, SOM (Self-Organizing Map). Ambos identifican grupos de individuos por comportamientos similares desde datos individuales, y han sido usados eficazmente para identificar etapas de desgaste en entornos industriales, justificados por el trabajo de Tobon-Mejia [Tobon-Mejia et al., 2012] y para caracterización energética de redes eléctricas, según trabajos de Naganathan [Naganathan et al., 2016]. Clustering jerárquico permite evidenciar la estructura de agrupación natural de los datos en función de la métrica que se fije como criterio de proximidad, mientras que los mapas auto organizados (SOM) descomponen los datos en un número de grupos prefijado. El aprendizaje supervisado usará algoritmos de regresión en Redes Neuronales Artificiales (ANN) por su buen comportamiento para predicción de variables de mantenimiento de máquinas, conforme el trabajo de Rohani [Rohani et al., 2011].

La planta productiva estudiada presenta en su sistema de gestión, una división clara entre mantenimiento y producción, ocurriendo igualmente para sus bases de datos, por ende, no existe una base de datos única donde se pueda acceder a toda la información de conjunta forma integral. Debido a esto, se debe acceder a datos de mantenimiento y producción de manera separada, por lo que se dispone de dos tablas distintas e identificadas como dataWO, mostrada en la Figura 4.3(a), correspondiente a la base de datos de mantenimiento, y dataWOF, presentada en la Figura 4.3(b), correspondiente a la base de datos de producción. Ambas tablas se definirán con mayor profundidad más adelante, no obstante, para aclarar las dos fases siguientes; la tabla dataWO contendrá los datos de entrada para los algoritmos de Análisis de Componentes Principales (PCA) y Clustering correspondientes a la técnica de aprendizaje no supervisado, mientras que la tabla dataWOF servirá como información de entrada para el algoritmo de regresión conforme a la técnica de aprendizaje supervisado. La separación de los departamentos de mantenimiento y producción a nivel de gestión en bases de datos conduce a realizar análisis separados y empleo de técnicas distintas, en cuanto al proceso de extracción de conocimiento, motivo por el cual no existe una relación secuencial entre las fases exploratoria y la fase de análisis.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	ESTADO_PT	TIPO_PT	NUM_PT	DEP_SOLIC	F_SOLIC	HORA_SOLIC	TALLER	URG	F_PLAZO	DESC_TRABAJO_
5301	8'A	'N182703'	'F'		25/04/2007	NaN	'TM'	'I'	25/04/2007	'CHAPA DE PROTEC
5302	8'N	'N182712'	'M'		25/04/2007	NaN	'OR'	'C'	NaN	'HACER PRUEBAS F
5303	8'N	'N182686'	'F'		25/04/2007	NaN	'TE'	'C'	NaN	'THAIL-SHUTER LIS
5304	8'N	'N182687'	'F'		25/04/2007	NaN	'TE'	'C'	NaN	'REVISAR INDUCTIV
5305	8'N	'N182696'	'F'		25/04/2007	NaN	'AL'	'C'	NaN	'LAVAOJOS JUNTO
5306	8'A	'N182705'	'M'		25/04/2007	NaN	'TE'	'C'	NaN	'REVISAR RADIANT
5307	8'N	'N182707'	'F'		25/04/2007	NaN	'TT'	'C'	NaN	'LA VALVULA LAVA
5308	8'N	'N182718'	'M'		25/04/2007	NaN	'TE'	'B'	NaN	'CAMBIO MODULO
5309	8'A	'N182719'	'M'		25/04/2007	NaN	'TE'	'B'	NaN	'REAJUSTAR RANG
5310	8'N	'N182695'	'M'		25/04/2007	NaN	'OR'	'C'	NaN	'PREPARAR PANTA
5311	8'A	'N182697'	'P'		25/04/2007	NaN	'TM'	'C'	NaN	'CAMBIAR CORREA
5312	8'N	'N182698'	'P'		25/04/2007	NaN	'TM'	'C'	NaN	'CAMBIAR CORREA
5313	8'N	'N182713'	'M'		25/04/2007	NaN	'OR'	'C'	NaN	'PRUEBAS COMUNI
5314	8'N	'N182714'	'M'		25/04/2007	NaN	'OR'	'C'	NaN	'PRUEBAS ENCODE
5315	8'N	'N182720'	'M'		25/04/2007	NaN	'OR'	'C'	NaN	'PRUEBAS CARGA/I
5316	8'N	'N182702'	'M'		25/04/2007	NaN	'TM'	'B'	NaN	'REPARAR SPORT

(a)



	1	2	3	4	5	6	7
	ID_Maq	MES	PRODDOPEESTUCADOS	PRODDOPEESTUCADOS	PRODDOPEESTUCADOVOLUM	TOTALPRODDOPE	DIASDETRABAJO
1	'M1'	1	255	5578	813	6646	29.5000
2	'M1'	2	0	5320	748	6068	28
3	'M1'	3	0	6345	304	6649	31
4	'M1'	4	0	6010	684	6693	30
5	'M1'	5	0	6227	802	7029	31
6	'M1'	6	0	6468	592	7060	30
7	'M1'	7	999	5234	980	7214	30.6700
8	'M1'	8	0	6102	1095	7197	30.6000
9	'M1'	9	1530	5287	632	7450	30
10	'M1'	10	1165	5777	790	7732	31
11	'M1'	11	0	6280	810	7091	30
12	'M1'	12	333	4345	684	5361	23
13	'M2'	1	6666	0	611	7277	29.5000
14	'M2'	2	6096	962	286	7344	28
15	'M2'	3	5804	1609	426	7839	30.6700
16	'M2'	4	6425	1503	0	7928	30

(b)

Figura 4.3. Datos importados desde el GMAO, tablas dataWO (a) y dataWOF (b)

4.3.1. FASE EXPLORATORIA DE DATOS

Existe una primera etapa preliminar, preparatoria de datos, en la cual los datos de partida, se corresponden con las órdenes de trabajo que han recibido las máquinas de fabricación de papel, máquinas M1 y M2, durante un año natural. Estos datos, han sido extraídos de una base de datos del programa de Gestión de Mantenimiento Asistido por

Ordenador (GMAO). Los datos obtenidos presentan 46 atributos y 1.080 instancias, órdenes de trabajo, después de un filtrado previo. En la Figura 4.3(a) se muestra el tratamiento de estos una vez han sido importados, tabla dataWO. La orden de trabajo es un documento que en su formato original presenta 46 campos que conforman los 46 atributos originales, tal como se detalla en la Tabla 4.3, los cuales se pueden agrupar en campos descriptivos de problema y resolución, con texto libre de tipo alfanumérico, otras variables categóricas de tipo numérico para albergar la clase de orden de trabajo, como: Tipo de Orden, Solicitante, Taller reparador, Tipo de Reparación, Tipo de Urgencia, Condición del activo e Implicación de Avería. Variables categóricas numéricas que albergan clases: Estado de situación de la orden, grupo homogéneo, sección, e instalación, tipo de inmovilizado, clase de trabajo, secuencias operativas. El resto de variables son de tipo fecha que registran fechas y horas de solicitud, programación de la intervención y finalización. No obstante, es lícito realizar un Análisis de Componentes Principales (PCA) sobre la totalidad de datos para los 46 atributos, aplicándolo sólo sobre los 7 de tipo numérico (4 asociados a costes de: totales, pedidos, material y mano de obra, 2 de tiempos de reparación y 1 de número de operarios). Estos atributos se evidencian en distinto color en la Tabla 4.3, como variables de entrada para el Análisis de Componentes Principales (PCA), descartándose el resto de variables originales ya que se utilizan para obtener información de contexto, pues documentan descriptivamente el problema ocurrido y su ubicación física, es por ello que servirán como variables de filtrado previo para localización y situación en la que se encuentra la intervención de mantenimiento.

En la fase exploratoria de datos, previa del aprendizaje automático, se ha usado la técnica estadística de Análisis de Componentes Principales (PCA) para reducir la dimensión de datos y encontrar los ejes principales que mejor representan dicha variación de datos. Estos ejes son ortogonales entre sí y se calculan mediante una aplicación lineal de cambio de base escogiendo un nuevo sistema de coordenadas para el conjunto original de datos en el cual la varianza de mayor tamaño del conjunto de datos es capturada en el primer eje, denominado primer componente principal, y la segunda varianza de mayor tamaño es el segundo eje, y así sucesivamente. Se reduce a

un problema de valores y vectores propios sobre la matriz de covarianza de los datos, obteniéndose una reducción de la dimensionalidad de los datos sobre aquellos ejes que contribuyen más a su varianza. En general se toman tantos en los ejes principales cuya suma represente al menos el 80 % de la variación de los datos originales, conforme el trabajo de Abdi y Williams [Abdi y Williams, 2010].

Tabla 4.3. Atributos originales de la orden de trabajo de mantenimiento

ESTADO_PT	Catórica Número	HH_ESTIMAD	Número
TIPO_PT	Catórica Letra	COND_ACTIVO	Catórica Letra
NUM_PT	Alfanumérico	CLASE_TRABAJO	Catórica Número
DEP_SOLIC	Catórica Letra	F_PROGRAMADA	Fecha
F_SOLIC	Fecha	HH_PROGRAMADAS	Número
HORA_SOLIC	Hora	DESC_TRABAJO_POSTERIORI_1	Alfanumérico
TALLER	Catórica Letra	DESC_TRABAJO_POSTERIORI_2	Alfanumérico
URG	Catórica Letra	IMPLIC_AVERIA	Catórica Letra
F_PLAZO	Fecha	ELEM_AVERIA	Alfanumérico
DESC_TRABAJO_1	Alfanumérico	CAUSA_AVERIA	Alfanumérico
DESC_TRABAJO_2	Alfanumérico	SUSTITUCION	Alfanumérico
GFH	Catórica Número	MAT_SUSTITUIDA	Alfanumérico
UBICACION	Alfanumérico	MAT_SUSTITUYENTE	Alfanumérico
COD_ELECTRICO	Alfanumérico	F_INICIO	Fecha
SECCION	Catórica Número	HORA_INICIO	Hora
INSTALACION	Catórica Número	F_FINAL	Fecha
DESC_EQUIPO	Alfanumérico	HORA_FINAL	Hora
NP_PT_PRINC	Alfanumérico	H_HOMBRE	Número
MATRICULA	Alfanumérico	C_MO	Número
TIPO_REP	Catórica Letra	C_MATERIAL	Número
NUM_SEQ	Catórica Número	C_PEDIDOS	Número
TIPO_INMOV	Catórica Número	C_TOTAL	Número
OPERARIOS	Número	HORA_REPAR	Hora

El análisis de componentes principales, parte de un conjunto de datos, están tabulados de forma que cada línea representa una observación, instancia o individuo y cada columna un atributo o variable. Considerando que se dispone de un conjunto de datos formado por n observaciones con k atributos. En notación matricial, se expresa $\tilde{A}_{(n,k)}$, donde \tilde{A} es la matriz que representa la tabla con los coeficientes (a_{ij}) como la i -ésima observación de la variable j -ésima, por lo tanto, la matriz de observaciones \tilde{A} , está formada por k vectores de variables, \bar{x}_j , ordenados por columnas y cada vector presenta n componentes correspondiendo a sus n observaciones, según se representa en la ecuación (1).

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} \bar{x}_1 & \bar{x}_2 & \dots & \bar{x}_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{k1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{1n} & \dots & x_{kn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Para reducir la dimensión de las variables, se debe encontrar otro subespacio vectorial que esté alineado con aquellas componentes vectoriales que supongan más variación, además deben formar una base para que dichas componentes se representen en un sistema ortogonal, es decir, linealmente independiente. Este problema, se reduce a encontrar un espacio vectorial cuyos vectores, \bar{v} , representen la variación de los datos, es decir, un sistema en el que se cumpla la ecuación (2):

$$\tilde{A} \cdot \bar{v} = \lambda \cdot \bar{v} \quad (2)$$

Aunque en este caso no se reduce la variación, más bien se trata de encontrar los componentes y ejes principales o valores y vectores propios de los datos. Siguiendo esta filosofía, se tratará de encontrar aquellos componentes y ejes principales que expliquen la máxima variación de los datos, para ello, en lugar de la matriz \tilde{A} , se obtendrá su matriz de covarianza, \tilde{C} , normalizada con media cero y desviación estándar uno. Se trata entonces, de obtener los valores y vectores propios de \tilde{C} . Es decir, resolver las ecuaciones (3) y (4):

$$|\tilde{C} - \lambda \tilde{I}| = 0 \quad (3)$$

$$(\tilde{C} - \lambda_i \tilde{I}) \bar{v}_i = \bar{0} \quad (4)$$

Una vez se obtienen las componentes principales λ_i y los ejes principales \bar{v}_i , que explican la variación de los datos, estos se ordenan en forma de diagrama de Pareto, seleccionando exclusivamente aquel conjunto de componentes p , que explican al menos el 80% de la variación de los datos. Obteniéndose, por ende, una reducción de las dimensiones, de los datos de k variables originales a $p < k$ variables reducidas. En general, la matriz de observaciones proyectados en los ejes principales, \tilde{Y} , contiene las n observaciones de las k variables, se obtiene mediante la ecuación (5), donde \tilde{P} es la matriz formada por columnas con los vectores propios \bar{v}_i , obtenidos de la ecuación (4).

$$\tilde{Y}_{(n,k)} = \tilde{A}_{(n,k)} \cdot \tilde{P}_{(k,k)} \quad (5)$$

Esta transformación expresa los datos originales en unos ejes que coinciden con la variación natural de los mismos. Un aspecto a considerar en este análisis es que su comportamiento es lineal y por lo tanto, no es adecuado para representar problemas no lineales. En casos de no linealidad es recomendable usar algoritmos de agrupamiento de Aprendizaje Automático (ML), como se verá más adelante.

4.3.2. FASE DE ANÁLISIS MEDIANTE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO

En esta fase, la etapa preparatoria de datos, se toman como datos de partida, además de los anteriores, los valores de producción y sus respuestas, como variables de eficacia y tiempos de fallos, para un año operativo de ambas máquinas de fabricación de papel (M1 y M2). Los datos son extraídos y agrupados desde dos bases de datos distintas, de mantenimiento y de producción. Los datos obtenidos presentan 35 atributos y 12 instancias correspondientes a cada mes, para cada máquina,

identificadas como M1 y M2. La Figura 4.3(b) muestra el tratamiento de estos datos previamente importados en forma de tabla dataWOF.

El informe de fabricación es un documento que en su formato original presenta 35 campos que conforman los atributos originales, tal como se muestra en la Tabla 4.4, los cuales se pueden agrupar en campos identificativos de la máquina en cuestión, de tipo alfanumérico, variables categóricas numéricas que se registran el mes natural. El resto de atributos son de tipo numérico y recogen valores de tiempo, coste, intervenciones y producción. Para cada máquina de fabricación de papel, se han seleccionado 3 variables predictoras como aquellos atributos que, por experiencia, caracterizan mejor la producción: producción diaria en toneladas de papel diarias, gramaje medio del papel en gramos por metro cuadrado y velocidad media en metros por segundo, señaladas en negrita en la Tabla 4.4; tratando de obtener como objetivo simultáneo dos respuestas predictivas, eficacia global en porcentaje de utilización de la máquina (OEE) y MTTF. Estas respuestas evalúan la aptitud de la función mantenimiento aplicado sobre el área productiva compuesta por ambas máquinas. Si bien podría realizarse un Análisis de Componentes Principales (PCA) como el realizado en la fase exploratoria para la tabla dataWO, no se ha considerado en esta ocasión debido a las pocas instancias, 12, de las que se disponían para cada máquina. Al ser el Análisis de Componentes Principales (PCA) un análisis estadístico, se ha considerado que las pocas instancias no son suficientes para realizar tal análisis, considerando en este punto una selección bajo criterio basado en experiencia. No obstante, conforme se vayan obteniendo más datos productivos y por ende mayor número de instancias, cabe realizar un Análisis de Componentes Principales (PCA) sobre la totalidad o aquellos atributos productivos de la Tabla 4.4 para reducir la dimensión y seleccionar aquellos que representan mayor influencia en la variación de datos.

El Aprendizaje Automático, Machine Learning (ML), se divide en dos técnicas, según trabajo de Palocsay [Palocsay et al., 2010]: aprendizaje supervisado, entrenando un modelo sobre unos datos de entrada y salida conocidos para predecir futuras salidas; y

el aprendizaje no supervisado, encontrando patrones ocultos y estructuras intrínsecas en los datos de entrada, en la Figura 4.4 se muestran ambas. Para cada técnica pueden emplearse distintos algoritmos, donde elegir el idóneo se realiza mediante ensayos de prueba y error.

Tabla 4.4. Atributos originales del informe de fabricación (base de datos de producción)

ID_Maq	Catagórica Alfanumérica	MEDIA DIA (PAROS)	Numérico
MES	Catagórico Numérico	OEE	Numérico
PROD.POPE NO ESTUCADOS	Numérico	NUM.LANZAMIENTOS	Numérico
PROD.POPE ESTUCADOS	Numérico	HORAS RECORTE CAMBIOS	Numérico
PROD.POPE ESTUCADO VOLUMEN	Numérico	GRAMAJE MEDIO	Numérico
TOTAL PROD. POPE	Numérico	ANCHO MEDIO REAL	Numérico
DIAS DE TRABAJO	Numérico	VELOCIDAD MEDIA	Numérico
TNS. PRODUCCION DIA	Numérico	ANCHO MEDIO PRESUP	Numérico
PROD.RECORTE	Numérico	PERDIDA POR ANCHO (CMS)	Numérico
TNS. PROD.RECORTE DIA	Numérico	PERDIDA POR ANCHO (TNS)	Numérico
% MERMA MAQUINA	Numérico	PROD. CABOS	Numérico
HORAS DISPONIBLES	Numérico	Coste	Numérico
PAROS AJENOS	Numérico	Coste/Tn	Numérico
MANTENIMIENTO	Numérico	Intervenciones	Numérico
PROGRAMADOS	Numérico	MTBF	Numérico
ROTURAS	Numérico	MTTR	Numérico
RESTO PRODUCCION	Numérico	MTTF	Numérico
TOTAL PAROS	Numérico		



Figura 4.4. Técnicas de Aprendizaje Automático (ML)

El aprendizaje supervisado usa técnicas de clasificación y regresión para desarrollar los modelos predictivos. La diferencia entre ellas reside en que la clasificación predice respuestas en variable discreta o categórica, mientras que la regresión predice respuestas en variable continua, según trabajo de Nilashi [Nilashi et al., 2016]. El aprendizaje no supervisado usa la técnica de agrupamiento (clustering) normalmente usado un análisis exploratorio de datos para encontrar patrones ocultos en forma de grupos en datos.

De los distintos algoritmos que se pueden emplear en el Aprendizaje Automático (ML), Máquinas de Vector Soporte, Análisis Discriminante, Clasificador Bayesiano Ingenuo, Vecinos Más Cercanos, Árboles de Decisión, K-Medias, Agrupación Jerárquica, Mezcla Gaussiana, Modelo Oculto de Markov, Redes Neuronales Artificiales, se han usado algoritmos modelados con Redes Neuronales Artificiales (ANN), por su versatilidad, tanto para técnicas no supervisadas (clustering) con finalidad de agrupar los datos de entrada con el objetivo de reconocer patrones y definir los grupos naturales presentes en los datos, como para técnicas supervisadas (regresión), cuya finalidad es la de establecer una correspondencia o mapeo entre los valores de entrada o predictores, y las variables de salidas u objetivos a predecir. Para ello, el modelo se entrena (o ajusta) mediante una base de conocimiento formada por ejemplos históricos de entradas y salidas conocidas.

Según Rumelhart [Rumelhart et al., 1986] el proceso de entrenamiento “back-propagation” de ANN, se divide en dos etapas: propagación hacia adelante y propagación hacia atrás. Para ello se usa una configuración de red formada por capas multi-perceptron, como se muestra en Figura 4.5, y función de activación, de rango de capa de salida y $[0,1]$ ante una entrada x , expresada por

$$y(x) = \frac{e^x}{(1+e^x)} \quad (6)$$

En la etapa de propagación hacia adelante, se ha seleccionado un conjunto de datos de entrada para entrenamiento $(x_1, x_2, \dots, x_{l-1})$, y se ha aplicado sobre la red para obtener las salidas y_d . Para cada neurona j de la capa oculta, el valor de cada núcleo n_j , viene dado por la siguiente ecuación:

$$n_j = \sum_{i=1}^l (w_{j,i} \cdot a_i) + b \quad (7)$$

donde cada valor de entrada de la capa previa a_i viene ponderado por $w_{j,i}$, la salida de la capa oculta viene expresada por

$$a_j = f(n_j) \quad (8)$$

función de activación del núcleo, esto se hace iterativamente para cada capa de salida hasta obtener la salida final y_d , dada por

$$y_d = f(n_{y_d}) = f\left(\sum_{j=1}^H (w_{y_d,k} \cdot a_k)\right) \quad (9)$$

La etapa de propagación hacia atrás, consiste en medir el error cometido, como diferencia entre el valor calculado y_d y el valor real y_r . Recalculando los pesos (w) tratando de minimizar el error a la inversa, primero obteniendo los nuevos pesos de la capa de salida $w_{y_d,k}^n$, en base a los antiguos, o , mediante la ecuación:

$$w_{y_d,k}^n = w_{y_d,k}^o + a_k \cdot [y_d \cdot (1 - y_d) \cdot (y_r - y_d)] \quad (10)$$

y posteriormente los nuevos pesos de la capa oculta $w_{j,i}^n$, con la ecuación:

$$w_{j,i}^n = w_{j,i}^o + w_{j,i}^o \cdot a_i \cdot [a_j \cdot (1 - a_j) \cdot (w_{k,j}^n - \delta_j)] \tag{11}$$

Donde δ_j se obtiene aplicando la ecuación (9) sobre la ecuación (12):

$$[y_d \cdot (1 - y_d) \cdot (y_r - y_d)] = \delta_{y_d} \tag{12}$$

Este proceso se repite, en el rango de las n observaciones, hasta llegar a un valor aceptable prefijado del error cometido. Se suele usar el error cuadrático medio, MSE, definido en la ecuación (13). Para asegurar una rápida convergencia del método iterativo se suelen emplear métodos matemáticos de optimización, en este caso se ha empleado el método de Regularización Bayesiana, conforme el trabajo de Kayri [Kayri, 2016].

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{d=1}^n (y_r - y_d)^2 \tag{13}$$

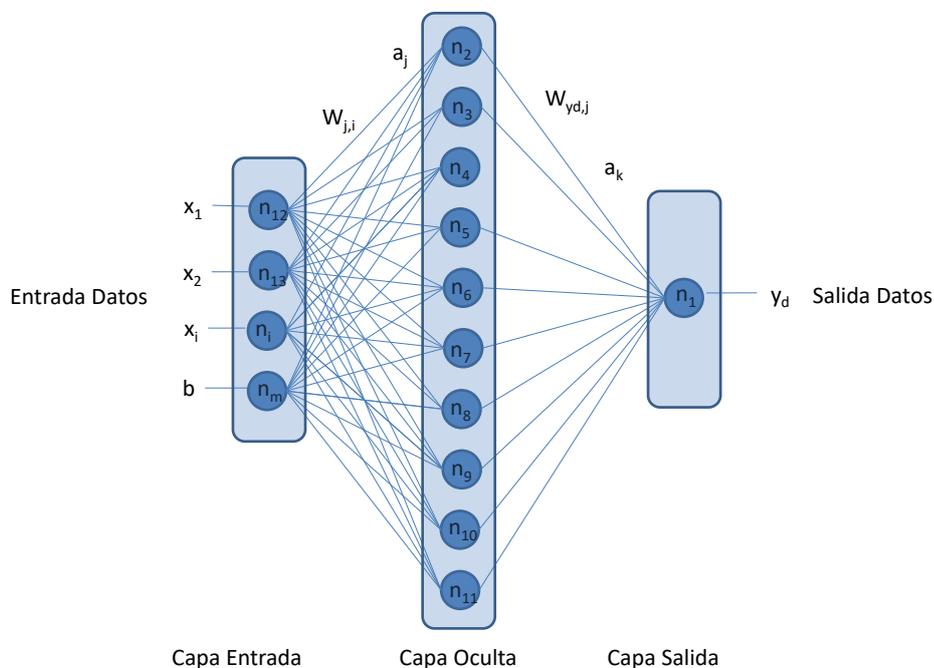


Figura 4.5. Red neuronal artificial de regresión entrenada perceptrón multicapa “back-propagation”

4.4. ESTRUCTURA Y METODOLOGÍA DEL SISTEMA ASISTIDO PARA LA DEFINICIÓN OPERATIVA

En el diseño de este módulo del sistema global de asistencia a la decisión y planificación de procesos de mantenimiento industrial, se ha decidido emplear la metodología de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM) por su eficacia demostrada en los entornos industriales donde se implanta, y a la que se dota de un sistema de conocimiento mediante algoritmos de CBR para dotar al proceso de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM) de mayor velocidad en la toma de decisiones de un grupo de expertos RCM en su implantación. De forma paralela, al ser un sistema asistido mediante conducción, se minimizan los errores humanos provocados por olvidos o descuidos en la correcta implantación de la metodología de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM). Finalmente, el sistema será un soporte informático, como aplicación independiente que implementa la metodología RCM conforme algoritmos de Razonamiento Basado en Casos (CBR), de tal forma que resulta un método RCM conductivo, dado que dirige o conduce la metodología de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM) asistiendo al experto desde su inicio hasta la finalización de la misma. En los siguientes epígrafes se describen la metodología de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM) y metodología de Razonamiento Basado en Casos (CBR):

4.4.1. METODOLOGÍA DEL MANTENIMIENTO CENTRADO EN FIABILIDAD

El método de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad, Reliability Centered Maintenance (RCM), fue originalmente diseñado para la industria aeronáutica por Nowlan y Heap [Nowlan y Heap, 1978], Anderson y Neri [Anderson y Neri, 1990], Smith [Smith, 1993], posteriormente fue empleado una extensión del concepto RCM por Moubray [Moubray, 1997] para un entorno industrial genérico. El concepto se basa en

diseñar un plan de mantenimiento basado en la fiabilidad operacional de la planta, en síntesis, se definen las funciones requeridas por los sistemas, posteriormente se emplea un Análisis de Modos de Fallos, Efectos y Criticidades (FMECA), donde se consideran los posibles fallos funcionales, siendo listados y vinculados los distintos modos de fallo asociados, sus efectos y criticidades. Se evidencia y se localizan los elementos críticos del sistema productivo analizado. La información se recoge en una hoja de trabajo de información, tal como se observa en la Figura 4.6. El próximo paso indica el uso de un diagrama de decisión, que ayuda a la decisión estratégica de un modo simple, mostrado su estructura en la Figura 4.6 y el detalle en Figura 4.7. Con este diagrama se ayuda a registrar la hoja de trabajo de decisión, considerando los siguientes puntos:

- 1) Qué rutina de mantenimiento debe ser realizada, con qué frecuencia y quién debe ejecutarla,
- 2) Qué fallos son suficientemente críticos como para garantizar un rediseño,
- 3) En qué casos se permite que el fallo desencadene en avería.

Tal como se puede ver en la Figura 4.6, se muestra una visión general del proceso y del registro de la información recogida, según el método de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad aplicado en un entorno industrial genérico. Las Figuras 4.8 y 4.9 muestran en detalle las hojas de trabajo de información y de decisión RCM, respectivamente. En síntesis, el método de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM) se define formalmente como “proceso usado para determinar qué debe hacerse para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que los usuarios esperan de él, en el actual contexto operacional”.

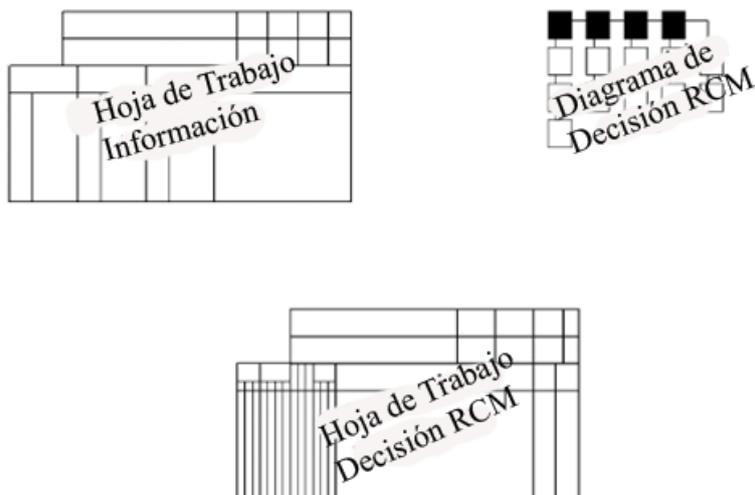


Figura 4.6. Enfoque RCM, estructurado con hojas de trabajo información, diagrama de decisión y registro de decisión, adaptado por Moubray [Moubray, 1997]

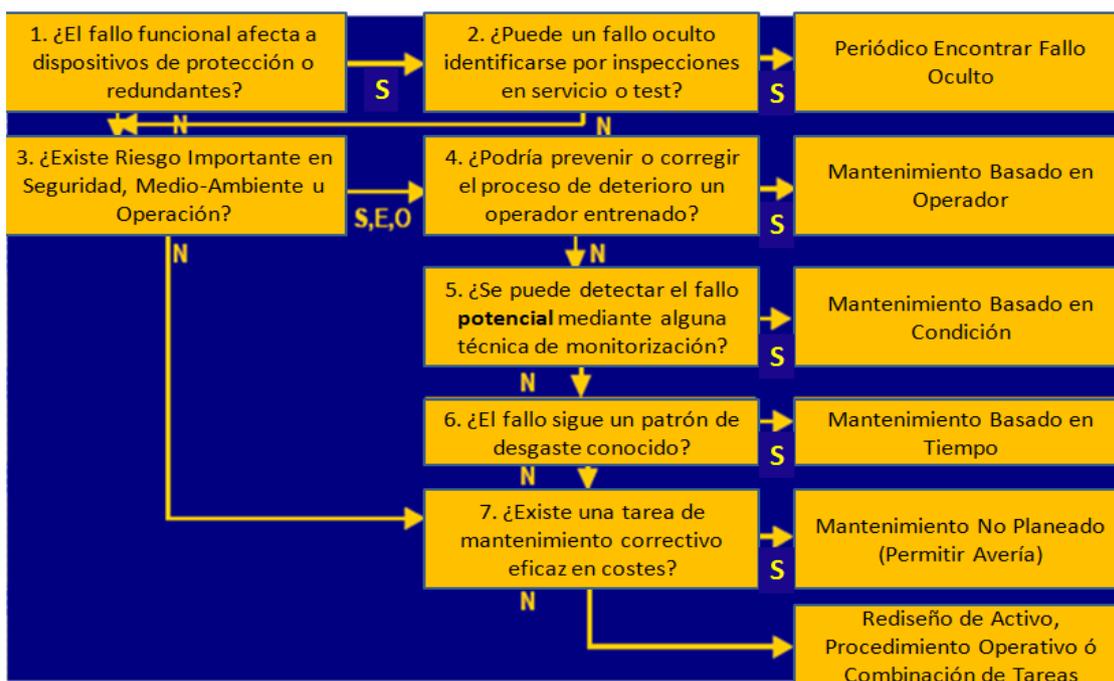


Figura 4.7. Detalle del diagrama de decisión RCM adaptado por Moubray [Moubray, 1997]

HOJA DE INFORMACIÓN AMFEC -RCM							
Nº. Equipo:	Tipo Equipo:	Fecha Inicio:	Nombre Grupo Trabajo:	Revisado por:	Nº. Rev.	Hoja	
Nombre Empresa	Component / Sub Assembly :	Fecha Final:	Lider:	Aprobado por:	Fecha	de	
FUNCIÓN		FALLO FUNCIONAL		MODO DE FALLO (Causa raíz)		EFECTOS DEL FALLO (Qué ocurre cuando falla)	

Figura 4.8. Detalle de una hoja de trabajo típica de información adaptado por Moubray [Moubray, 1997]

HOJA DE DECISIÓN RCM																							
Nº. Equipo:		Tipo Equipo:		Fecha Inicio:	Fecha Fin:	Nombre Grupo de Trabajo:	Revisado por:	Nº. Rev.	Hoja														
Nombre Empresa		Objetivo de Grupo :				Lider:	Aprobado por:	Fecha:	de														
Información Referencia	Copnsecuencias Fallo					Tareas Defecto				Tareas Propuestas				Clasificación de Mantenimiento (Validar Clasificación)		Intervalo Inicial	Responsable						
	F	FF	FM	H	S	E	O	H1	H2	H3	H4	H4	H5	S4	PM			CBM	RTF	RED	MOD		

Figura 4.9. Detalle de una hoja de trabajo típica de decisión adaptado por Moubray [Moubray, 1997]

Las ventajas que implica este método se enumeran a continuación:

- 1) Aumento de seguridad e integridad medioambiental, mejoras en el rendimiento operativo (producción, calidad de producto y servicio al usuario).
- 2) Aumento de la eficacia en costes de mantenimiento por reducción de la carga de trabajo con métodos tradicionales.
- 3) Aprovechar el máximo del ciclo de vida en activos costosos usando adecuadamente mantenimiento basado en condición.
- 4) Actualización de las bases de datos y documentación adaptándolos a los cambios circunstanciales del contexto operacional.
- 5) Aumento de la motivación individual de los participantes en el proceso.
- 6) Mejora del grupo de trabajo, transfiriendo mejor conocimiento a operadores de producción y mantenimiento.

Las grandes desventajas que presente el método de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad aplicado a un entorno industrial genérico son:

1) Objetivo centrado más en fiabilidad que mantenibilidad y disponibilidad.

2) Estrictamente aplicado es un método complejo y costoso, justificable en industrias aeronáuticas y de alto riesgo, donde los requisitos de alta fiabilidad son imperativos, aunque el método es demasiado costoso para la industria general, donde el problema de mantenimiento es más económico que de fiabilidad.

Las desventajas citadas pueden suplirse considerando las conclusiones de dadas por Moubray [Moubray, 1997] en la que expone sustituir la aplicación estricta del método por un enfoque más flexible y personalizado del mantenimiento de la empresa a aplicar. Para considerar criterios de mantenibilidad, disponibilidad e incluso criterios económicos se consideran los aportes ofrecidos por Rosqvist [Rosqvist et al., 2009], donde se propone un enfoque de planificación de mantenimiento orientado a valor. Es decir, si se modifica la metodología del mantenimiento centrado en fiabilidad aplicado a un entorno industrial genérico, conforme a los enfoques citados, se consiguen corregir las desventajas e incorporar mejoras significativas.

4.4.2. METODOLOGÍA DEL RAZONAMIENTO BASADO EN CASOS

La metodología del Razonamiento Basado en Casos, Case Based Reasoning (CBR), fue originalmente precursada por Schank [Schank, 1977] a partir de sus trabajos de investigación sobre memoria dinámica [Schank, 1982], donde descubre que la memoria recuerda casos resueltos como patrones de similitud para resolver nuevos problemas planteados, de este modo define el razonamiento basado en casos como “la resolución de problemas usando o adaptando las soluciones de viejos problemas” [Riesbeck y Schank, 1989]. El Razonamiento Basado en Casos (CBR) es un paradigma de inteligencia artificial que combina resolución de problemas y aprendizaje, como establece Watson [Watson, 1999], es decir, Razonamiento Basado en Casos (CBR) es una la metodología

para describir un problema planteado donde puede usarse diversas tecnologías para su resolución. En nuestro caso se ha empleado jCOLIBRÍ desarrollado por Díaz-Agudo [Díaz-Agudo et al., 2007] como tecnología para implementación algorítmica de la metodología de Razonamiento Basado en Casos (CBR) en lenguaje de programación Java.

En síntesis, la metodología de Razonamiento Basado en Casos (CBR) se basa en la hipótesis de razonamiento humano, donde problemas similares presentan soluciones similares, por ende, se trata de resolver problemas mediante adaptación de soluciones a problemas anteriormente resueltos con éxito y de descripción similar al nuevo problema planteado. En este sentido cabe diferenciar dos espacios, el espacio de planteamiento del problema, denominado espacio de descripción, y el espacio de soluciones. La metodología de Razonamiento Basado en Casos (CBR) se describe como proceso cíclico, tal como se observa en la Figura 4.10, con cuatro actividades: Recuperar, Reutilizar, Revisar y Retener. Una vez que se plantea un nuevo problema, se crea un nuevo caso en el espacio de descripción, la actividad de Recuperar posibilita obtener desde la base de casos aquellos problemas más similares con el nuevo caso descrito. Obtenido el caso más parecido, denominado caso recuperado, la segunda actividad se denomina Reutilizar, es decir, se usa la solución del caso recuperado como aproximación a la solución del nuevo problema planteado. Esta solución propuesta, si es necesario, se revisa o se adapta mejor al problema inicialmente planteado, obteniendo un caso adaptado con una nueva solución. Si esta solución se valida como buena, la última actividad consiste en retener el caso como nuevo caso aprendido e incorporándola como un nuevo caso añadido a la base de casos. Como se puede observar, la metodología de Razonamiento Basado en Casos (CBR), persigue aumentar el conocimiento mediante la incorporación de nuevos casos cada vez que se invoca el ciclo CBR.



Figura 4.10. Ciclo estándar de la metodología CBR adaptado por Moubray [Moubray, 1997]

De las cuatro actividades, se focaliza la atención en la actividad de recuperación, para establecer que esta metodología permite el uso de distintas tecnologías de recuperación de casos por similitud; vecino más cercano, Nearest Neighbour (NN), inducción, lógica difusa, redes neuronales, etc. En este trabajo se han usado algoritmos de vecino más cercano (NN) para modelar la similitud entre el nuevo caso y los casos existentes, para obtener el caso recuperado. kNN es el método de recuperación más ampliamente utilizado en la metodología CBR [Watson, 1997], esto ha sido evaluado y contrastado como el método más preciso comparado con otras metodologías como agrupamiento k-medias (k-means), FCM (Fuzzy C-Means) y SOM, de acuerdo con Guo-Niu [Guo-Niu, 2015], empleándose métodos de reducción de dimensiones para mejorar la eficiencia de la recuperación como la integración de métodos NRSM-GHSOM (Neighborhood Rough Set Method- Growing Hierarchical Self-Organizing Map). De acuerdo con Watson [Watson, 1999], la similitud puede valorarse conforme se describe en la siguiente ecuación:

$$\text{Similitud}(T,S) = \sum_{i=1}^n f(T_i, S_i) \cdot w_i \quad (14)$$

La similitud entre un caso objetivo, T , y un caso, S de la base de casos, se evalúa con la función de similitud, f^{β} , para el atributo, i , extendiéndolo desde el primero hasta el último, n , de cada caso. Como se aprecia en la ecuación (14), se trata de una suma ponderada por el peso w_i que marca la importancia de cada atributo i . Extendiendo esta valoración entre el caso objetivo T y todos los casos de la base de casos, S_j , de los m existentes, se puede obtener un listado normalizado⁴ y ordenado de mayor a menor, configurándose así desde los casos más similares a los menos próximos al objetivo. Finalmente se tomarán de todo el listado, sólo un grupo de ellos, los k primeros más similares al objetivo. En este trabajo se ha considerado un valor de $k=3$, conforme a la recomendación de intervalo comprendido de 1 a 4 según el estudio de Salton y McGill [Salton y McGill, 1983]. Se ha demostrado en algunos casos, que la elección del valor de k influye en la eficacia del proceso CBR, así una posible mejora del método para aumentar la eficacia de la actividad de recuperación, podría ser no decidir tácitamente un valor de k , si no calcularlo automáticamente basado en optimización de la disparidad estadística aplicada a la base de casos, evitando la intervención humana y su error asociado para la elección del valor de k [Chieh-Yuan y Chuang-Cheng, 2009].

En cuanto a las tres actividades restantes del ciclo CBR, se hace notar el hecho que depende mucho de la base de casos y por tal motivo de su estructura en una base de datos, esto revela el hecho que la metodología de Razonamiento Basado en Casos (CBR) es muy susceptible -en cuanto su eficacia- de ser implementada usando tecnologías de bases de datos, como SQL, tanto en las consultas de nuevos casos planteados como la gestión de los mismos.

³ La función de similitud es una medida de la distancia, por lo que se pueden usar cualquier métrica de distancia entre dos datos comparables; euclídea, norma 1, norma infinito, coseno, etc.

⁴ Se normaliza el valor de similitud en un rango de 0 a 1, siendo 0 totalmente disímil y 1 totalmente similar o coincidente.

4.4.2.1. IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DEL RAZONAMIENTO BASADO EN CASOS: JCOLIBRI

El sistema de diseño conductivo de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM) se ha implementado en lenguaje de programación Java usando librerías especializadas de CBR, para ello se ha seleccionado el entorno jCOLIBRI de acuerdo con Recio-García [Recio-García et al., 2008]. En particular se ha usado jCOLIBRI versión 2 ó jCOLIBRI 2 como marco de desarrollo y construcción de sistemas de Razonamiento Basado en Casos (CBR) desarrollado por Recio-García [Recio-García, 2008] en Java.

La arquitectura sigue una clara división en dos capas, mostradas en la Figura 4.11, una capa orientada a usuarios desarrolladores Java y otra, orientada a usuarios diseñadores en sistemas de Razonamiento Basado en Casos (CBR), en forma de armazón de caja blanca que posibilita incluir las características de jCOLIBRI en las aplicaciones CBR diseñadas para un uso concreto. En este trabajo se ha usado la capa de desarrollo en Java, cuya arquitectura permite la representación de casos y manejo de los mismos mediante una librería específica de métodos de Razonamiento Basado en Casos (CBR) para usar en la aplicación dedicada CBR objeto del presente trabajo, denominada AIRCM.

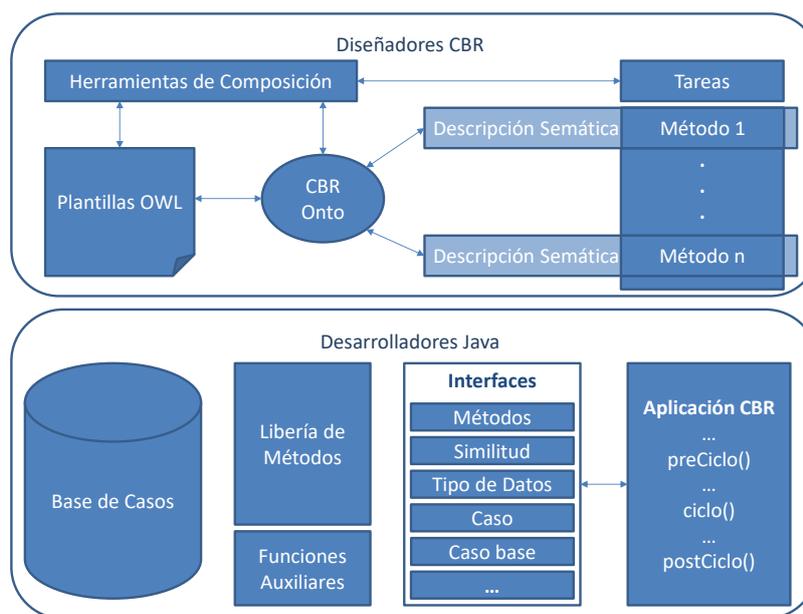


Figura 4.11. *Arquitectura de jCOLIBRI 2, adaptado por Recio-García [Recio-García et al., 2008]*

Las características principales de la arquitectura jCOLIBRI se dividen en: persistencia, núcleo, división de la aplicación y estructura de los casos. La persistencia incluye conectores a las bases de datos como medio que almacena los casos organizados en memoria. El núcleo engloba las clases e interfases más importantes. La división de la aplicación está modularizada en preciclo, ciclo y postciclo. Preciclo y postciclo, Figura 4.12, contienen métodos encargados de gestionar los recursos requeridos por los métodos del ciclo principal.

```

public interface StandardCBRAplication {
    public void configure() throws ExecutionException;
    public CBRCaseBase preCycle() throws ExecutionException;
    public void cycle(CBRQuery query) throws ExecutionException;
    public void postCycle() throws ExecutionException;
}
    
```

Figura 4.12. *Código fuente Java de Interfaz de Aplicación CBR, [Recio-García, 2008]*

Los métodos principales del ciclo son dos:

- Métodos de Recuperación y Selección, de este grupo de métodos, se ha usado el método de recuperación por vecino más cercano (NN), con métricas de similitud globales y locales, dichas métricas permiten comparar tipos enumerados, cadena de texto o caracteres, números, etc. Cabe aclarar que las métricas locales usan la función de similitud, f de la ecuación (14), para calcular el valor de similitud entre los distintos atributos que describen el caso objetivo y los de los casos comparables de la base de casos, mientras que la métrica global calcula la media ponderada (w_i) de los valores de similitud devueltos por las métricas locales. Existen otros métodos de recuperación: diversidad basada en la media, recuperación por filtro. Una vez recuperados los casos, se usan métodos que seleccionan un grupo de los casos recuperados para presentarlos al usuario final, se ha usado la aproximación más sencilla consistente en devolver los k mejores casos, cuya combinación aglutina el método de recuperación de los k vecinos más próximos o k NN.
- Métodos de Reutilización y Revisión, donde se incluyen métodos básicos para copiar la solución de un caso a la consulta o copiar valores desde los atributos a la descripción de la solución.

Finalmente, la estructura de los casos, se definen en una serie de clases que posibilita toda la representación de casos, como se puede observar en el diagrama de clases de la Figura 4.13. Se destaca el hecho de la clase `CBRCase` que hereda de la consulta, la clase `CBRQuery`, la cual define los métodos que describen el nuevo caso planteado mientras que `CBRCase` contiene los métodos que manejan la solución.

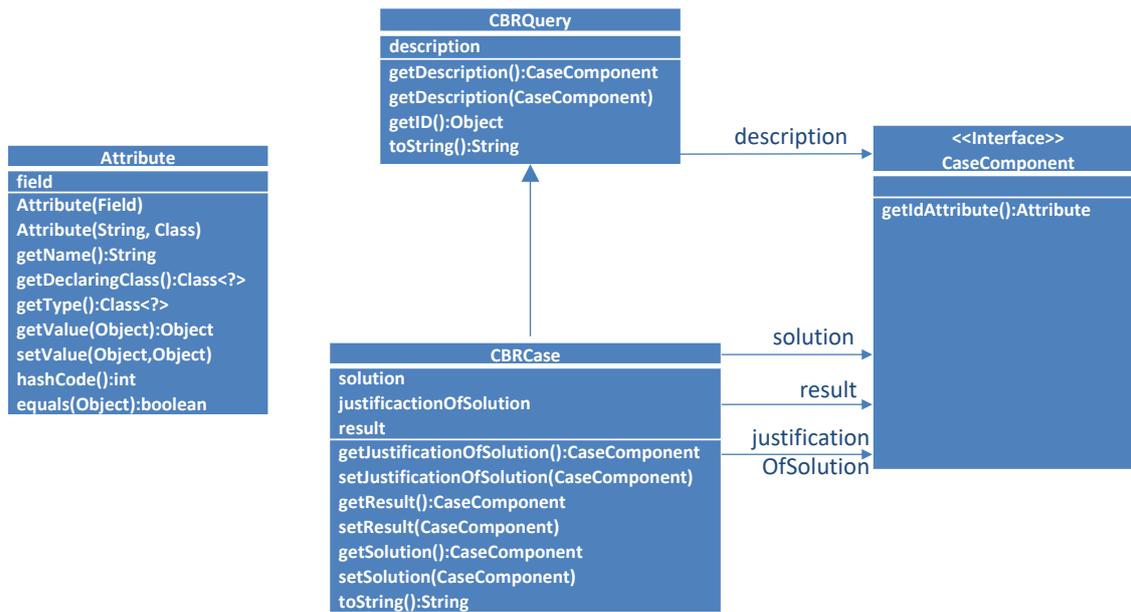


Figura 4.13. Diagrama de Clases con la estructura de los casos en jCOLIBRI 2 adaptada por Recio-García [Recio-García, 2008]

4.5. CONSIDERACIONES FINALES

En este capítulo se ha establecido la estructura metodológica para cada definición, empleando para cada módulo las metodologías y herramientas que permitirán, partiendo de los resultados de cada módulo precedente tomar esa información de salida como entrada al módulo siguiente, cada módulo tratará y procesará la información correspondiente según la metodología empleada y posibilitará obtener como resultado final las acciones de mantenimiento particularizadas para acometer en el centro productivo. Este resultado se detalla mediante un plan de mantenimiento que deberá ser implementado en el programa de Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador (GMAO) del centro.

CAPÍTULO 5:

RESULTADOS

5.1. Introducción al capítulo_____	67
5.2. Resultados del sistema asistido para la definición estratégica_____	67
5.2.1. Modelado del esquema Proceso Analítico Jerárquico- Cuadro de Mando Integral en Expert Choice_____	67
5.2.2. Cuestionario para valoración del panel de expertos_____	68
5.2.3. Análisis de resultados en el ámbito estratégico _____	70
5.2.4. Análisis de sensibilidad _____	71
5.2.5. Análisis de la robustez de la decisión de expertos _____	73
5.3. Resultados del sistema asistido para la definición táctica _____	76
5.3.1. Análisis de los resultados en el ámbito táctico _____	90
5.4. Resultados del sistema asistido para la definición operativa_____	92
5.4.1. Base de casos _____	96
5.4.2. Diseño e implementación de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad conductivo: Aplicación_____	96
5.4.3. Uso de la aplicación para resolver mediante asistencia un nuevo caso de fallo_____	107
5.4.4. Análisis de resultados en el ámbito operativo_____	115
5.5. Consideraciones finales_____	118

CAPÍTULO 5: RESULTADOS

5.1. INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos en el sistema asistido global siguiendo las tres definiciones establecidas; estratégica, táctica y operativa, según el esquema general mostrado en la Figura 3.1.

5.2. RESULTADOS DEL SISTEMA ASISTIDO PARA LA DEFINICIÓN ESTRATÉGICA

En el proceso de puntuación y de decisión estratégica se ha usado el paquete informático denominado Expert Choice, en adelante EC, como aplicación dedicada a la metodología del Proceso Analítico Jerárquico (AHP), siguiendo el esquema de la Figura 4.1 según el modelo planteado en el capítulo 4. El uso de ésta ha permitido desarrollar el proceso más ágilmente, se han propuesto formularios de evaluación que rellenará el panel de expertos escogidos para el caso de una fábrica de producción de papel. Otra ventaja que presenta el programa Expert Choice es el análisis posterior que se puede realizar. Una vez procesada la información de entrada (juicios de expertos), permite realizar un análisis de sensibilidad, observando qué variables son más sensibles o que provocan mayor tasa de cambio en la elección final.

5.2.1. MODELADO DEL ESQUEMA PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO- CUADRO DE MANDO INTEGRAL EN EXPERT CHOICE

El problema a modelar tiene como objetivo seleccionar aquella área productiva, entre el grupo de áreas, que se decidan mejorar su eficacia productiva, conforme a un nivel estratégico para el negocio industrial, representado por su grupo de expertos $\{E_1, E_2, E_3, E_4\}$, según la Tabla 4.2. El grupo de áreas a estudiar se ha restringido a cuatro,

denominadas respectivamente $\{AP_1, AP_2, AP_3, AP_4\}$, como resultado de un consenso con el grupo de expertos para acotar el número de las mismas a seleccionar. El resultado ha sido establecer una orden de prioridad sobre el grupo de áreas a evaluar, siendo la que ha obtenido una mayor puntuación la elegida para aplicarle las acciones adecuadas e implementadas en el plan de mantenimiento diseñado a medida en base al historial de fallos y patologías que presenta la citada área. El modelo Proceso Analítico Jerárquico-Cuadro de Mando Integral (AHP-BSC), visto en la Figura 4.2 se ha trasladado al modelo bajo entorno de EC, tal como se muestra en la Figura 5.1.

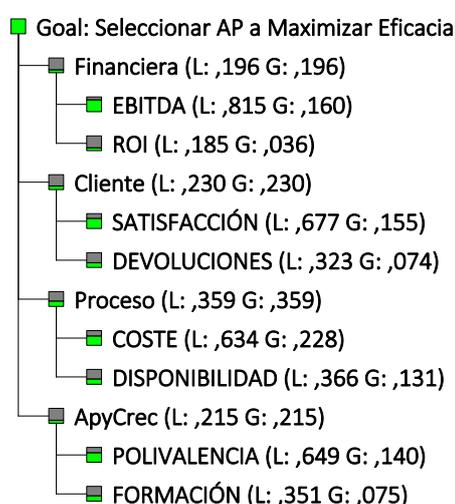


Figura 5.1. Modelo AHP-BSC ponderado en el entorno Expert Choice

5.2.2. CUESTIONARIOS PARA VALORACIÓN DEL PANEL DE EXPERTOS

La jerarquía modelada ha sido puntuada con los criterios y desde el punto de vista de cada experto E_i $\{1/2/3/4\}$, para cada enfoque estratégico BSC {Financiero/Clientes/Proceso/Mejora Continua}, priorizando la importancia tiene cada variable Indicadores Clave de Rendimiento (KPI). Para ello, siguiendo la metodología Proceso Analítico Jerárquico (AHP), se han establecido formularios en los que se han recogido la información, donde primero se han ponderado por comparación pareada las perspectivas entre sí y posteriormente, para cada perspectiva, se han ponderado las variables Indicadores Clave de Rendimiento (KPI). Al usarse el método Delphi en dos etapas, una vez recibidos los primeros cuestionarios puntuados de cada experto, se

calculado su media, siendo devueltos a cada experto, incorporando la puntuación media del grupo frente a su primera puntuación individual y se les ha preguntado si están de acuerdo con la media, en el caso de no estar conformes se les ha solicitado que justifiquen su respuesta.

Estos cuestionarios han sido respondidos por cada uno de los cuatro expertos, combinando sus juicios individuales, para los cuales se ha establecido una ponderación de la jerarquía AHP-BSC modelada, Figura 5.1, donde L representa la ponderación local y G la ponderación global, el color verde del cuadro representa el peso relativo global de cada perspectiva y variable. Para cada cuestionario puntuado se ha evaluado el grado de inconsistencia y se ha comparado con el valor máximo establecido (0,1). Debiéndose realizar una nueva valoración por parte del experto en aquellos juicios que presentan mayor inconsistencia ($>0,1$), y aunque EC permite identificar las mayores inconsistencias y asistir al experto para reducirla, esto no se ha realizado por suponer una iteración más en el proceso, perdiéndose la ventaja del método Delphi de dos pasos. No obstante, para limitar el valor de consistencia debajo del máximo admisible, se ha evaluado el grado de consistencia global (0,03) y éste si se ha observado como tolerable ($<0,1$), obteniéndose el resultado como consistente y no siendo necesaria una nueva iteración corrigiendo la consistencia individual para cada cuestionario. Cabe destacar que la mayoría de los expertos estuvieron conformes con la respuesta media del cuestionario presentado, aunque un experto matizó algunas divergencias. La ponderación combinada representa los resultados siguientes de priorización de perspectivas y variables, como se muestra en la Figura 5.2. Se observa en la primera de las figuras, por orden, que la perspectiva proceso es la de mayor ponderación (35,9 %), seguida de cliente (23 %), aprendizaje (21,5 %) y financiera (19,6 %).

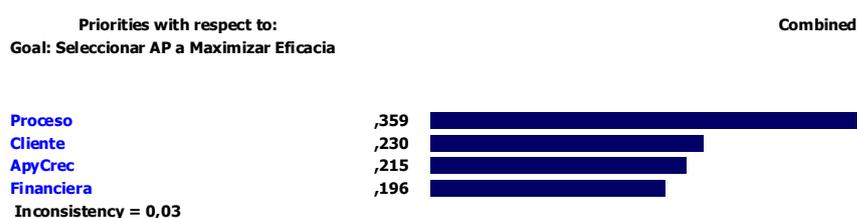


Figura 5.2. Priorización de perspectivas y variables, juicio de expertos combinados

En la Figura 5.3 se muestra en mayor detalle, para cada perspectiva, el peso específico de cada variable KPI.

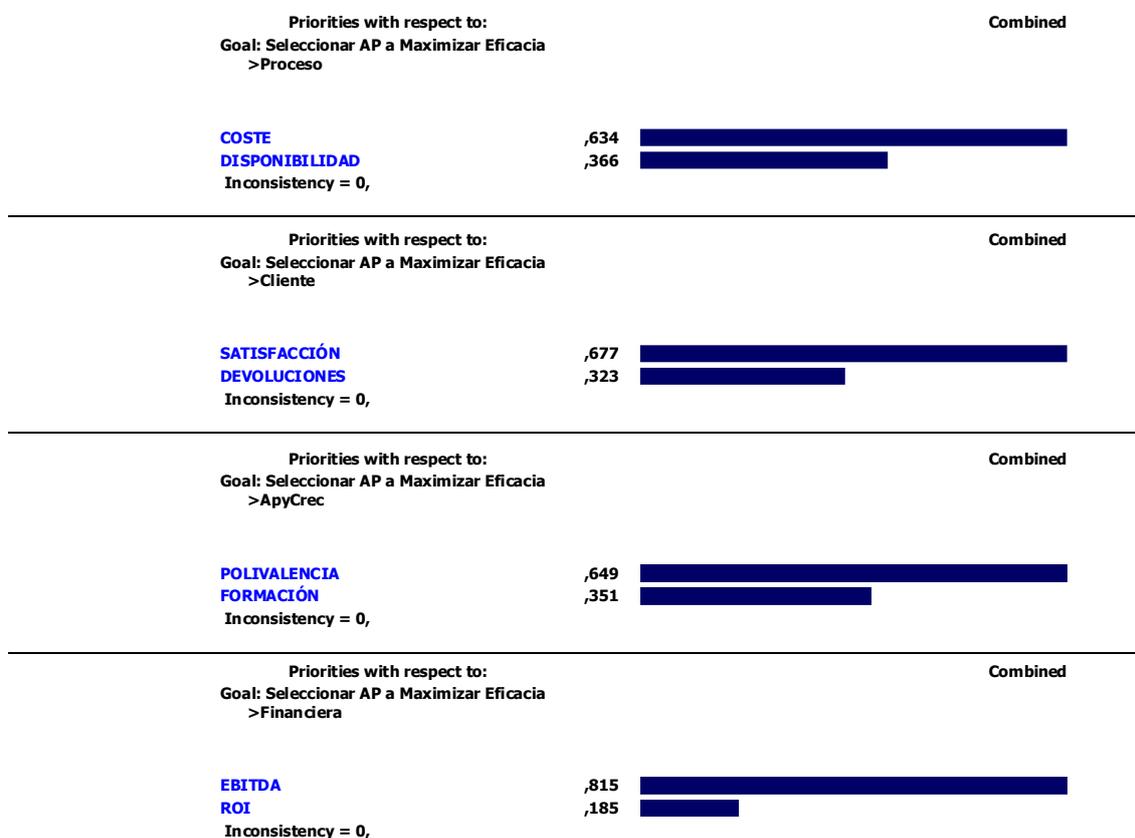


Figura 5.3. Priorización de variables, juicio de expertos combinados

5.2.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS EN EL ÁMBITO ESTRATÉGICO

Como resultado obtenido, se muestran las puntuaciones de las cuatro áreas productivas, siendo la de mayor puntuación la preferida para maximizar su eficacia, y por ende a medir su rendimiento conforme la definición táctica del módulo M2 y para aplicarle las acciones resultantes del plan de mantenimiento personalizado. La Figura 5.4 muestra los resultados ordenados de las áreas productivas, siendo Área Productiva 2 la que ha sido seleccionada como aquella a maximizar eficacia. La inconsistencia global obtenida (0,03) es inferior a la tolerancia máxima admisible (0,1).

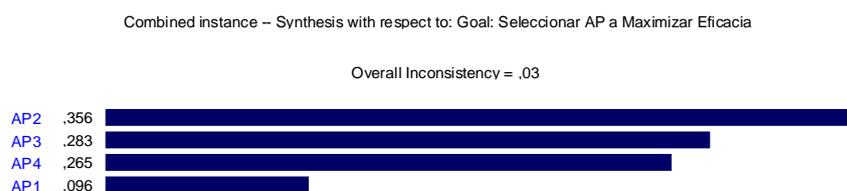


Figura 5.4. Resultado de selección del modelo AHP-BSC

Se ha decidido realizar un análisis de sensibilidad para evidenciar aquellas perspectivas y variables que afectan más a la elección de las distintas alternativas. Es decir, cuáles son las variables más sensibles, cuyos pequeños cambios en sus valores, provocan cambios de resultados en la selección final de la alternativa a maximizar. Esto permite evaluar distintos escenarios de simulación respondiendo a cuestiones tipo qué pasaría si se modifican algunas variables. El análisis de sensibilidad se muestra en distintos gráficos, evidenciando estos efectos en las figuras sucesivas.

5.2.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

La representación de un análisis de sensibilidad permite observar cómo al variar las prioridades en los criterios (perspectivas) o subcriterios (KPI) provocarían cambios en las prioridades de las alternativas (AP). Desde el punto de vista de las perspectivas, como se puede apreciar, las más influyentes en la decisión son cliente y proceso. Desde el punto de vista de las alternativas, AP1 y AP3 muestran valores estables (menos sensibles) a las variaciones de las distintas perspectivas, no sucede así con la alternativa AP4, muy sensible a la perspectiva cliente y con la alternativa AP2, muy sensible a la perspectiva proceso. La representación del análisis de sensibilidad muestra cómo las distintas alternativas fueron priorizadas o ponderadas relativamente respecto a cada criterio (perspectiva) como a la decisión global. La Figura 5.5 muestra que el área productiva AP2 fue priorizada principalmente por las perspectivas proceso y aprendizaje. No obstante, se observa que la perspectiva cliente presenta gran influencia sobre el área productiva AP4, esto es, un incremento en la citada perspectiva provocaría que el área a maximizar fuese AP4 en lugar de AP2. Un hecho decisional destacable es que la alternativa AP1 no

sería elegida para ninguna variación de las perspectivas, como se observa en la citada figura.

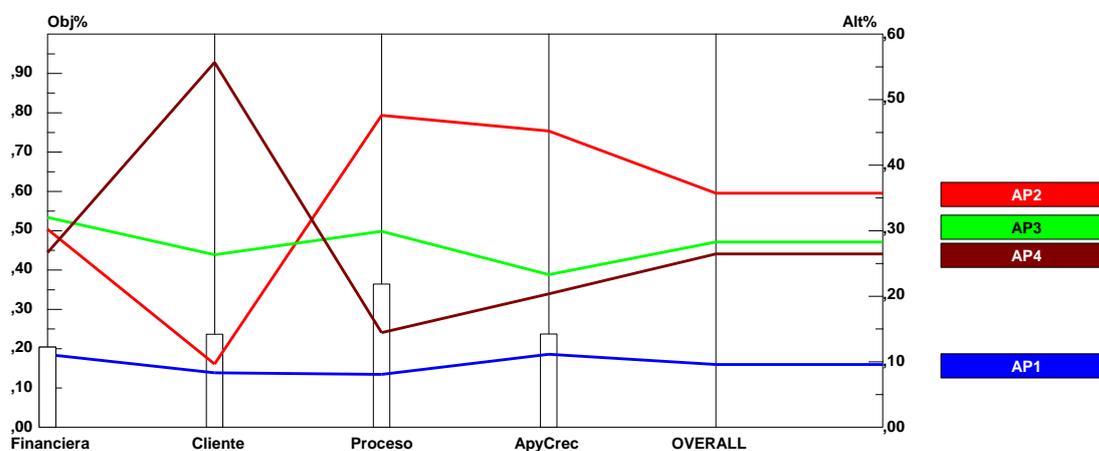


Figura 5.5. Representación de análisis de sensibilidad del modelo AHP-BSC en función de las perspectivas

Entrando en detalle en la **perspectiva proceso**, en la Figura 5.6 pueden observarse las variables Indicadores Clave de Rendimiento (KPI) más influyentes, la no existencia de puntos de corte entre las distintas líneas, explica que las variaciones en los Indicadores Clave de Rendimiento (KPI) coste o disponibilidad no supondrá un cambio en la alternativa seleccionada. El mismo resultado puede observarse en la Figura 5.7 con la **perspectiva cliente**, donde los valores Indicadores Clave de Rendimiento (KPI) satisfacción o devoluciones no son sensibles a cambios en las alternativas AP4 y AP3, existe un cambio de priorización, aunque leve, en las alternativas AP1 y AP2 para cambios en los Indicadores Clave de Rendimiento (KPI) satisfacción y devoluciones, evidenciando que son variables sensibles para las áreas productivas 1 y 2 e insensibles para las 3 y 4.

Proceso (L: ,359 G: ,359)

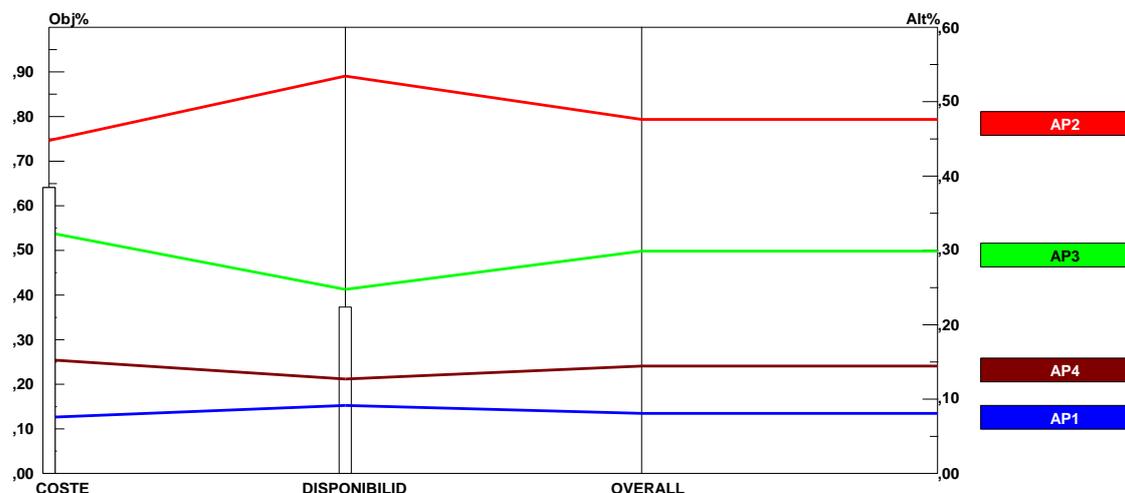


Figura 5.6. Representación de análisis de sensibilidad del modelo AHP-BSC para las variables KPI de proceso

Cliente (L: ,230 G: ,230)

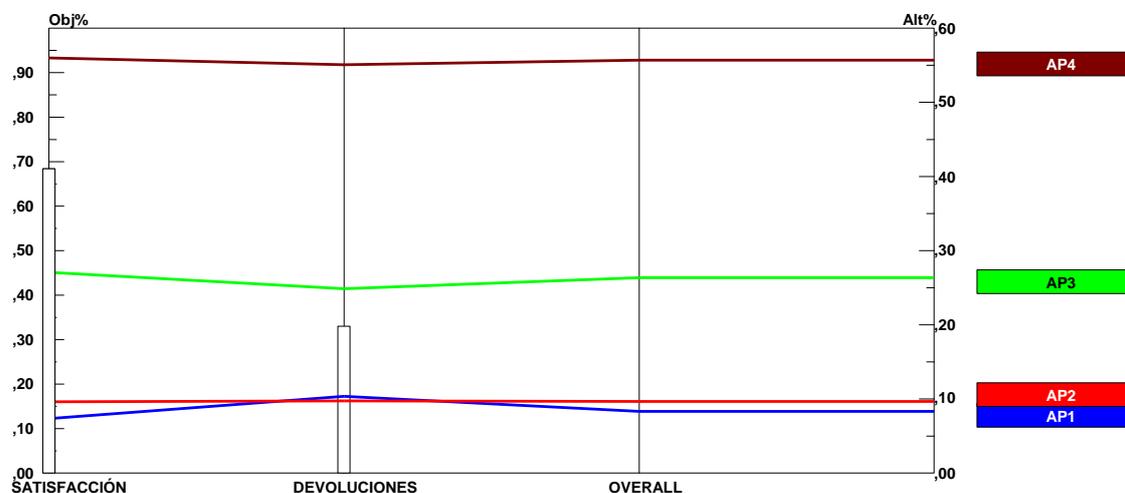


Figura 5.7. Representación de análisis de sensibilidad del modelo AHP-BSC para las variables KPI de cliente

5.2.5. ANÁLISIS DE LA ROBUSTEZ DE LA DECISIÓN DE EXPERTOS

Un análisis de sensibilidad gradiente por perspectiva, Figura 5.8, evidencia para cada perspectiva qué variaciones alteran la decisión final del área productiva a maximizar,

dependiendo de su ponderación frente al objetivo global. En síntesis, en la **perspectiva financiera**, situación adoptada (20%) dista mucho del 84%, donde se produce una inversión, luego esta perspectiva no es sensible a incertidumbres y por tanto la decisión adoptada por el grupo de expertos para esta perspectiva es robusta. En la **perspectiva cliente**, la ponderación obtenida del 23% dista del 35% donde se produce la inversión, declarándose la decisión del grupo robusta. Un patrón parecido aparece en la **perspectiva proceso**, la ponderación obtenida (36%), valor suficientemente distante de 12% donde se produce la inversión, indicando que la ponderación de la perspectiva proceso es robusta. En la **perspectiva aprendizaje y crecimiento** se observa que no existen puntos de corte y cualquier ponderación adoptada produce el mismo resultado en la selección de la alternativa, se infiere que esta perspectiva no es determinante en la elección.

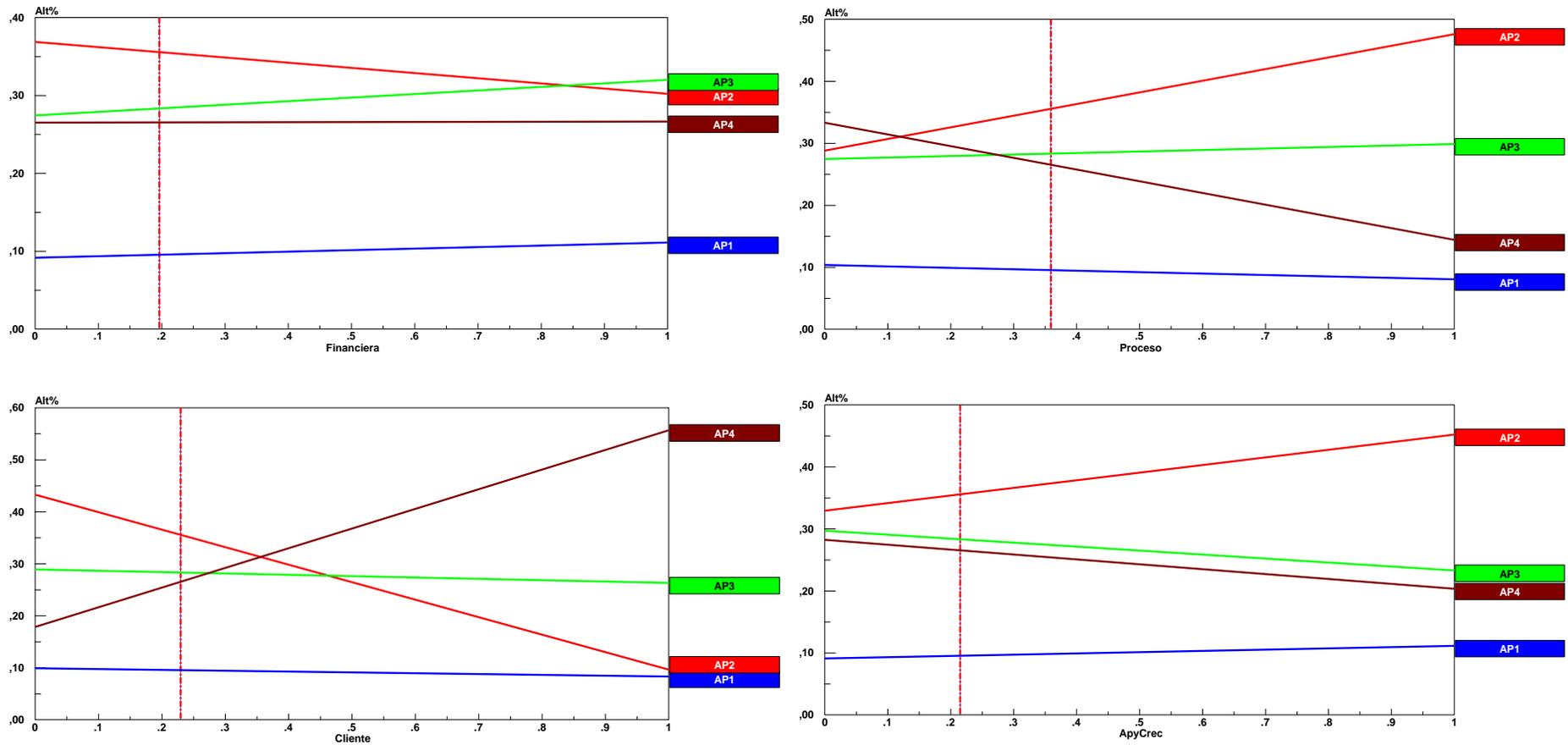


Figura 5.8. Representación de análisis de sensibilidad gradiente para el modelo AHP-BSC por cada perspectiva

5.3. RESULTADOS DEL SISTEMA ASISTIDO PARA LA DEFINICIÓN TÁCTICA

Se ha conseguido integrar nuevas funcionalidades sobre un cuadro de mando personalizado de la planta industrial, en este caso agregando análisis predictivo para la respuesta de disponibilidad esperada de un área productiva, considerada núcleo principal de la planta industrial, de este modo se consigue anticipar la información posible la disponibilidad futura a medio plazo (horizonte mensual) de ambas máquinas, hecho que permite al departamento de mantenimiento corregir posibles desviaciones fuera de tolerancia antes de producirse, mejorando su respuesta.

En la primera fase, exploratoria, mediante el uso de Análisis de Componentes Principales (PCA), se ha empleado para descubrir las mínimas dimensiones que explican la variación de los datos. Aplicando el Análisis de Componentes Principales (PCA) sobre el conjunto de órdenes de trabajo del área productiva 2 (compuesta por las secciones 11 y 12), se han descubierto cinco dimensiones o ejes principales PC_i , Figura 5.9(a), suficientes para explicar la totalidad de variación de los datos originales contenidos en las órdenes de trabajo del área productiva. Como resultado del Análisis de Componentes Principales (PCA), se han identificado 5 componentes que explicarían el 100% de la variación, por lo tanto, se detectan 2 vectores linealmente dependientes de entre las variables de entrada, reduciendo en dos la dimensión original, por otro lado, de los 5 componentes principales, 3 explicarían el 78,6% de la variación de datos. Este trabajo tiene como objetivo el número de intervenciones, costes y tiempos de mantenimiento y se representarán los resultados del Análisis de Componentes Principales (PCA) sobre los primeros 3 componentes principales. En la Figura 5.9(a) se observa que las tres primeras componentes principales representan el 78,6% de variación de los datos, motivo por el cual se decide representar los datos usando estas tres componentes como ejes principales de representación, esto se visualiza en Figura 5.9(b), con proyecciones de los datos originales sobre los tres ejes principales. Previamente los datos se han normalizado con media 0, desviación estándar 1. La Tabla 5.1 muestra los valores obtenidos en el Análisis de Componentes Principales (PCA) de las métricas de mantenimiento, donde se han obtenido las proyecciones sobre las tres componentes principales de las variables de

mantenimiento seleccionadas en negrita de la Tabla 4.3 (costes totales, de pedidos, material y mano de obra, tiempo estimado de reparación, tiempo realizados de reparación y número de operarios). En la Tabla 5.1 se han incluido también los valores de la Figura 5.9(a) (varianzas-autovalores, porcentajes de varianzas explicadas individuales y acumuladas). De las siete variables de mantenimiento objeto de estudio, se ha observado que las que ganan más relevancia en ejes principales son: coste de pedidos, coste total y coste de material, esto se ha considerado extrayendo el módulo o norma euclídea de cada variable en los tres ejes principales, se evidencia en la última columna de la Tabla 5.1. El resto de las cuatro variables restantes tienen una amplitud más o menos parecida, por lo que se consideran de igual relevancia.

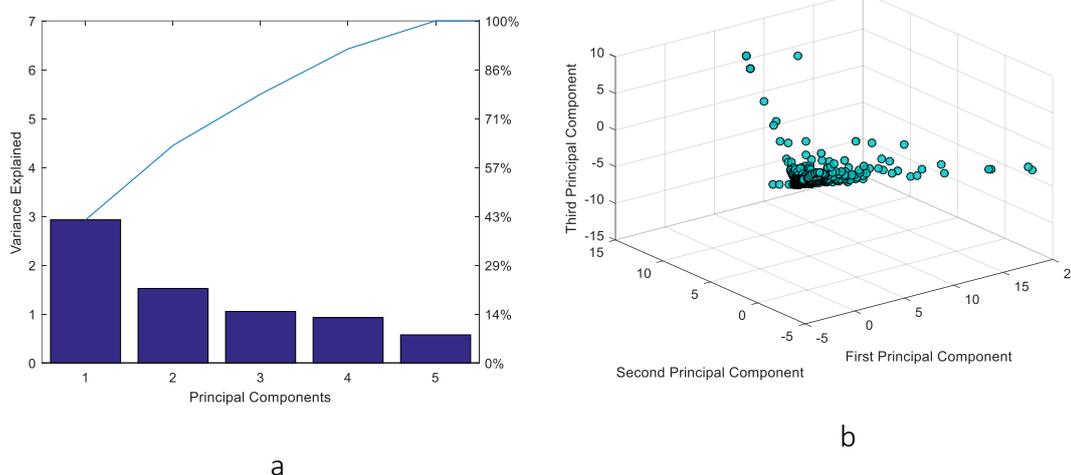


Figura 5.9. (a) Varianza de componentes principales. (b) Datos proyectados en componentes principales

En la segunda fase, de análisis de Aprendizaje Automático (ML), se ha usado la técnica clustering para descubrir patrones ocultos en datos, como la agrupación natural de los mismos. Para esta técnica, se han empleado, de los datos almacenados en la tabla dataWO, Figura 4.3(a), sólo dos atributos: coste total y horas de reparación.

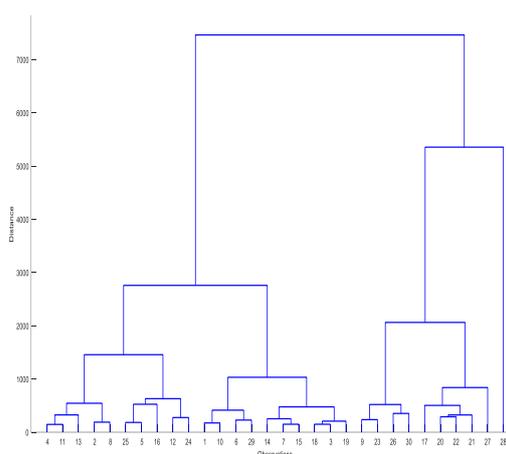
Tabla 5.1. Resultados PCA. Valores de componentes principales**COMPONENTES PRINCIPALES**

MÉTRICA	PC1	PC2	PC3	MÓDULO VARIABLE MÉTRICA
C_TOTAL	0,4696	0,4760	0,0360	0,6697
C_PEDIDOS	0,1598	0,5714	0,6089	0,8502
C_MATERIAL	0,2323	0,3913	-0,5737	0,7323
C_MO	0,5234	-0,2668	-0,0987	0,5957
H_HOMBRE	0,5235	-0,2668	-0,0987	0,5957
H_ESTIMADAS	0,3793	-0,2661	0,2076	0,5077
OPERARIOS	0,0900	-0,2839	0,4861	0,5701

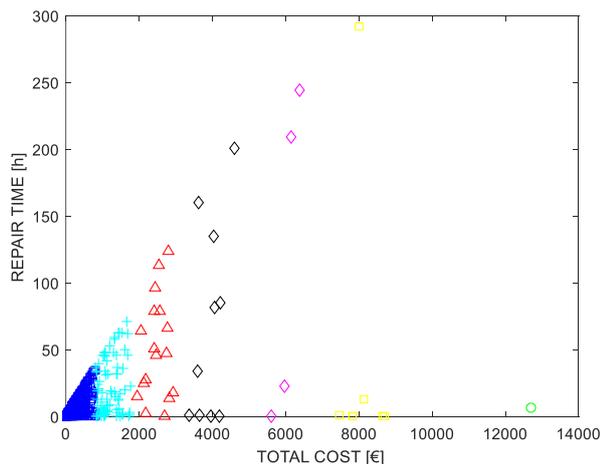
Con la técnica clustering se han usado dos algoritmos, el primero de ellos, clustering jerárquico, el cual permite crear un dendrograma, diagrama de árbol que mide el número de grupos naturales, o “clusters”, dependiendo del criterio de distancia que se fije entre datos. En este caso, fijándose un valor de distancia en el eje de ordenadas, se “poda el árbol” mediante una recta horizontal que corta el dendrograma en tantas intersecciones como grupos naturales aparecen. En este caso, Figura 5.10(a), se observa que para distancias medias euclídeas de 6000 a 7000 presenta dos grupos naturales, de 3000 a 5500, tres grupos, de 2000 a 3000, cuatro grupos, y por debajo de 1000 crecen considerablemente el número de grupos, debido a esta compresión, se toma un valor de 900, podando el árbol en 7 grupos naturales, se puede visualizar los distintos grupos de datos por colores en la Figura 5.10(b). Como se puede apreciar, la técnica clustering jerárquico permite disponer de una visión general del número de agrupaciones que se pueden obtener en función del valor de distancia elegida. Existen diversas métricas de distancia, incluso se puede definir una personalizada, en este caso se ha usado la distancia euclídea como métrica.

Se ha usado de nuevo la técnica clustering, empleando un segundo algoritmo de una red neuronal artificial de Mapa Auto-Organizado (SOM) sobre el sub-conjunto de datos

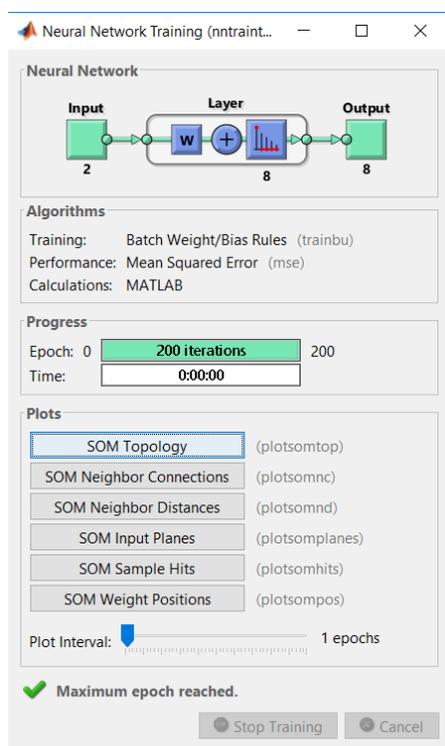
coste total y tiempo de reparación, como variables elegidas reflejando costes y tiempos de la intervención de mantenimiento de la planta. Un Mapa Auto-Organizado (SOM) o de Kohonen consiste en una capa competitiva que puede clasificar un conjunto de datos de vectores con cualquier número de dimensiones en tantas clases como neuronas tenga la capa según Bose y Mahapatra [Bose y Mahapatra, 2001], Köksal [Köksal et al., 2011] y Hernández [Hernández et al., 2004]. Las neuronas se disponen en una topología bidimensional del conjunto de datos. La red ha sido entrenada con 2 variables y 1.080 observaciones de entrada se muestra en la Figura 5.10(c) y su topología bidimensional con impacto de datos en Figura 5.10(d).



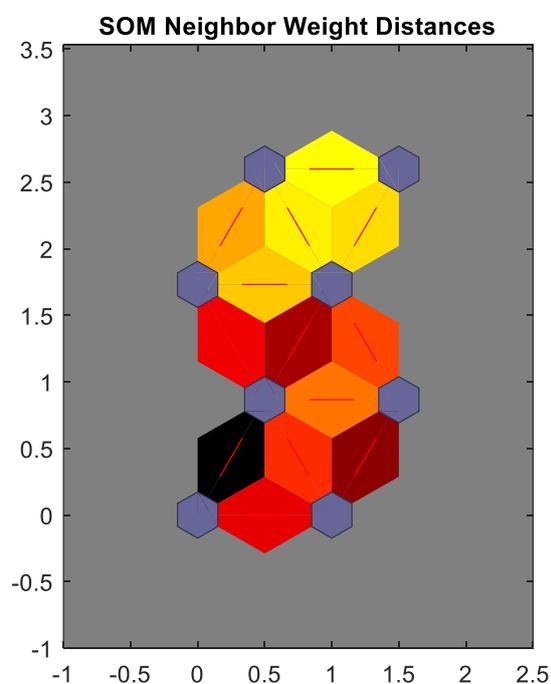
a



b



c



d

Figura 5.10. (a) Dendrograma (b) datos (c) red neuronal SOM entrenada. (d) topología SOM

La red se ha configurado mediante 2 dimensiones, 2x4, descubriéndose un patrón de 8 grupos naturales en los datos, distribuidos con una clara relación lineal entre los mismos, observándose también que existe un dato discrepante que no guarda relación

lineal y que revela una reparación no convencional, extraordinaria realizada en una de las máquinas y no fue catalogada como reparación normal, hecho que pone de manifiesto un error en la introducción de la información en el programa de Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador (GMAO). Hecho que también se ha puesto de manifiesto con el punto verde (único grupo) de la figura de clustering jerárquico. La Figura 5.11(a) visualiza los datos originales en las dos variables (coste, tiempo) y la Figura 5.11(b) se observan los 7 grupos naturales y la relación lineal entre ellos, además del grupo 8 que no guarda relación lineal, ya discutido.

La interpretación de estos resultados, bajo el enfoque de mantenimiento, muestran que la relación lineal entre los grupos viene a reflejar el siguiente análisis sobre la distribución de los grupos, observándose que los cuatro primeros grupos para costes entre 0 y 1.000 € están muy cercanos entre sí, mientras que los centroides de 2.000 €, 3.000 € y 5.000 € presentan mayor distancia. Con esto se infiere que la mayoría de las intervenciones suponen un coste inferior a 1.000 €, existiendo menor número de intervenciones de a intervalos de 1.000 €.

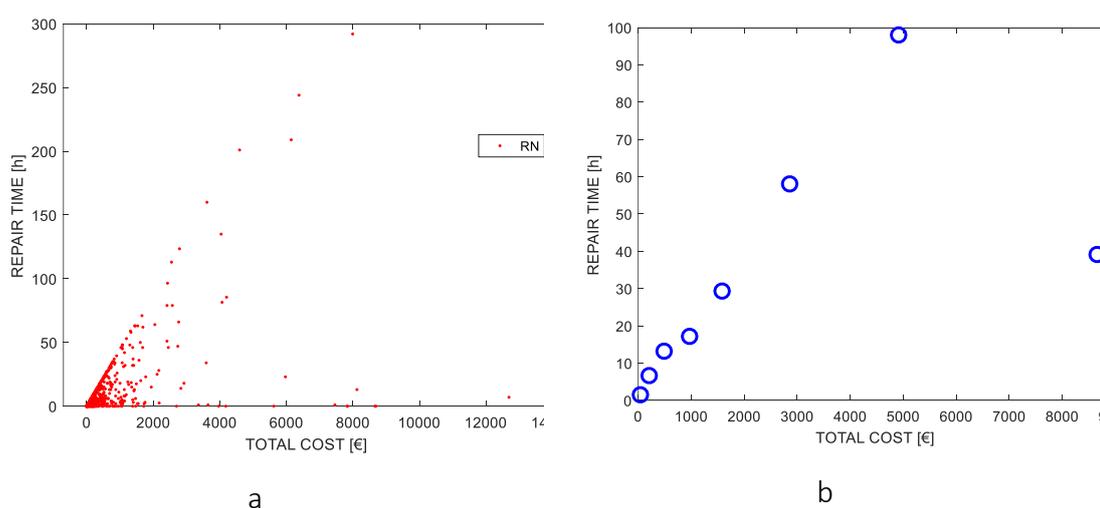


Figura 5.11. (a) Red neuronal artificial SOM entrenada. (b) grupos naturales de la topología SOM

Por último, la técnica de regresión empleada ha permitido predecir los valores futuros de disponibilidad de ambas máquinas (M1 y M2) principales de producción de papel, mediante los indicadores de eficacia global de cada máquina (OEE) de fabricación de papel, y de su Tiempo Medio Hasta el Fallo (MTTF). Además, estos valores se han calculado simultáneamente en el modelo entrenado de Red Neuronal Artificial (ANN). Se ha usado una red neuronal entrenada con datos de entrada (predictores) que aúna: las tres variables de producción y las dos variables de disponibilidad objetivo, de salida, OEE y MTTF, medidos para los 12 meses del año para cada máquina. Para esta técnica, a partir de los datos almacenado en la tabla dataWOF, Figura 4.3(b), solo se han utilizado 3 atributos de producción: producción diaria en toneladas de papel por día, peso promedio del papel en gramos por cuadrado metro y velocidad media en metros por segundo.

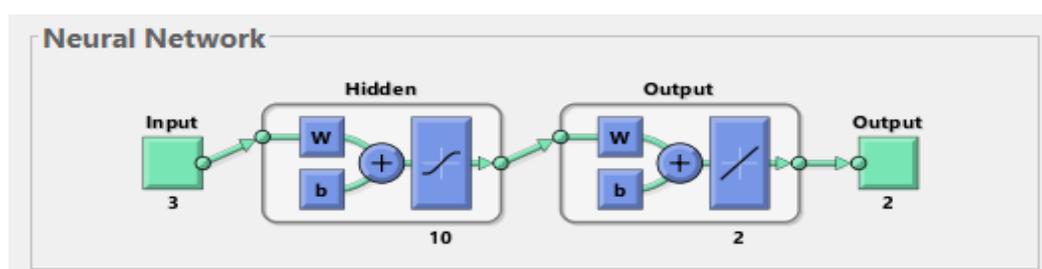


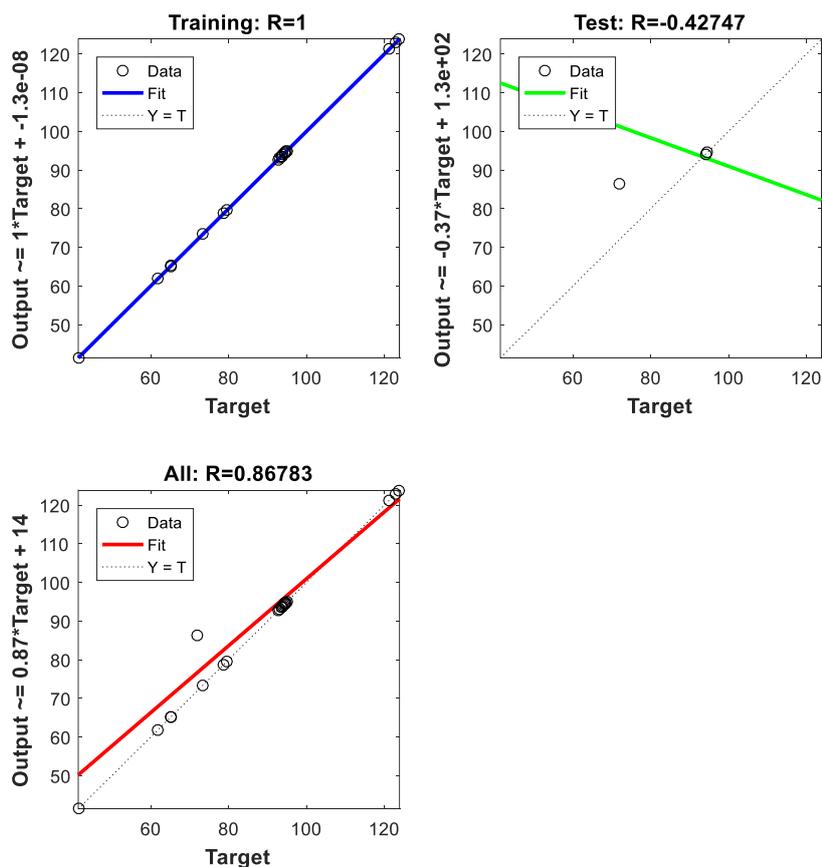
Figura 5.12. ANN de regresión entrenada para las máquinas de papel M1 y M2

Para las máquinas de fabricación de papel M1 y M2, se ha empleado una red neuronal artificial “feed-forward” de 3 variables de entrada, 10 capas con neuronas ocultas y 2 capas lineales de neuronas de salida, mostrada en la Figura 5.12. Esta red neuronal puede ajustar problemas de mapeo multidimensional arbitrariamente bien, dados datos consistentes y suficientes neuronas en su capa oculta. La red ha sido entrenada con el 70% de los datos mediante el algoritmo de “back-propagation” de regularización bayesiana, el 15% de los datos ha sido usados para validación y el 15% restante para test. Se ha empleado una función de rendimiento error cuadrático medio, Mean Squared Error (MSE), Figura 5.13(a) y Figura 5.14(a), para las máquinas M1 y M2, respectivamente. El resultado de la red entrenada se ha dado por buena según los

coeficientes de ajuste de regresión Figura 5.13(b) y 4.14(b), para M1 y M2 respectivamente.

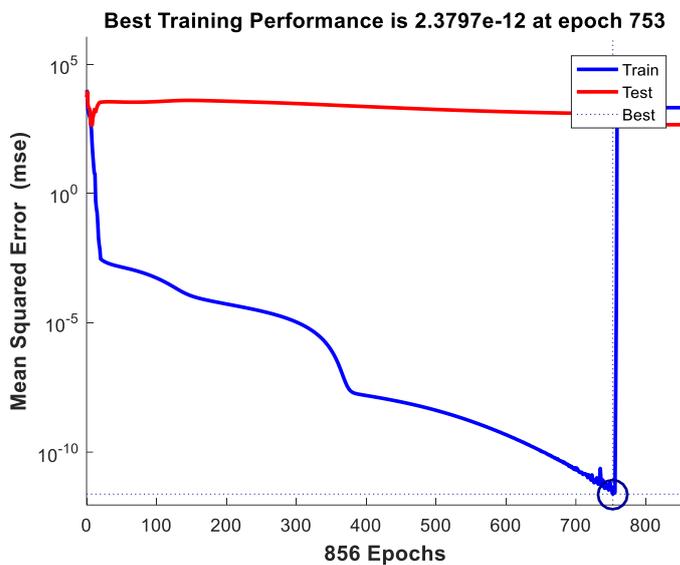


(a)

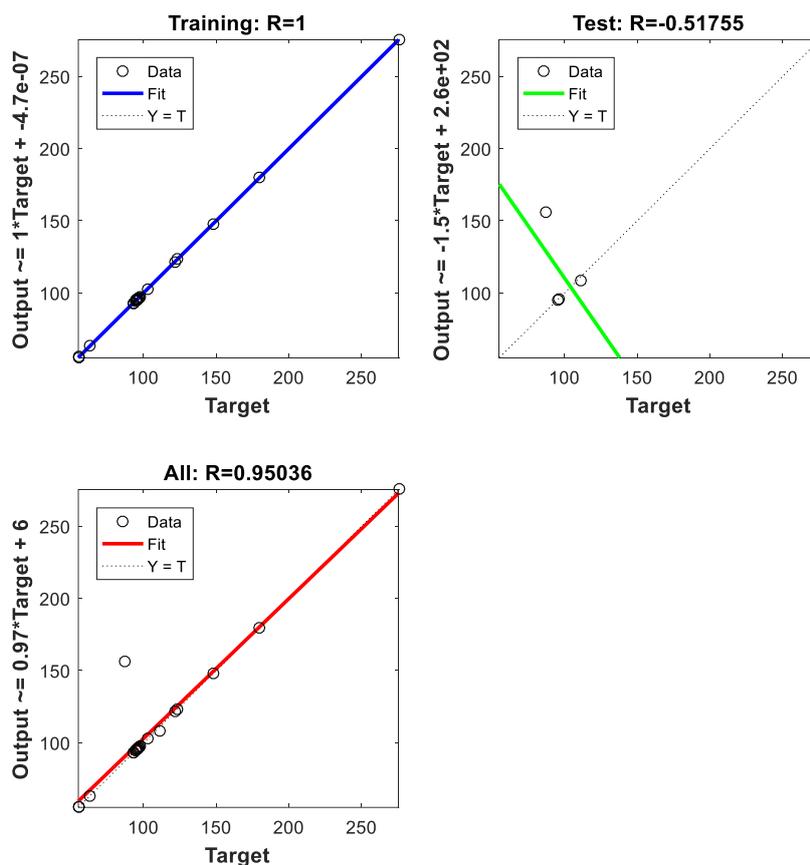


(b)

Figura 5.13. (a) Entrenamiento de ANN para M1; (b) Ajuste de regresión



(a)



(b)

Figura 5.14. (a) Entrenamiento de ANN para M2; (b) Ajuste de regresión

Para cada máquina, que conforman el área productiva objeto, el resultado del ajuste se ha observado cotejando las variables de salida medidas OEE y MTTF, en azul, con las previstas por el modelo OEEp y MTTFp, en rojo. Los resultados de M1 se muestran en la Figura 5.15(a) y los de M2 en la Figura 5.15(b). En definitiva, esta red puede predecir el comportamiento en términos de mantenimiento que tendrá el área productiva de la planta, en cuanto a los valores de disponibilidad (eficacia y tiempos operativos), alimentando el modelo con valores predictores de producción. Conforme se vayan introduciendo mayor número de instancias, esto es, datos entrada/salida, la red se re-entrenará y será más fiable, ya que se ajustará con mayor número de ejemplos reales ocurridos, por ende, irá adquiriendo mayor experiencia y conocimiento.

En clave de mantenimiento, supone realizar predicciones de disponibilidad y tiempos operativos en función de tres valores característicos de producción, el modelo establecido de este modo permite prever la Eficiencia Global de Equipo (OEE) y Tiempo Medio Hasta el Fallo (MTTF) observando un comportamiento no lineal en el tiempo, tal y como se muestra en la Figura 5.15. En este sentido, se han observado las respuestas para la máquina M1 donde la eficiencia OEE oscila entre un valor medio de 94 % con una baja dispersión de $\pm 0,66$ %, no sucediendo así con los valores de tiempo MTTF de media 81,07 h de alta dispersión $\pm 25,82$ h. En cuanto a la máquina M2 la Eficiencia Global de Equipo (OEE) ha presentado un valor medio de 95,52% con una baja dispersión de $\pm 1,12$ %, no obstante, los valores del Tiempo Medio Hasta el Fallo (MTTF) de media 118,03 h con muy alta dispersión $\pm 59,35$ h. Concluyendo que el modelo de regresión puede predecir con buena precisión valores de alta y baja amplitud de oscilación en el tiempo.

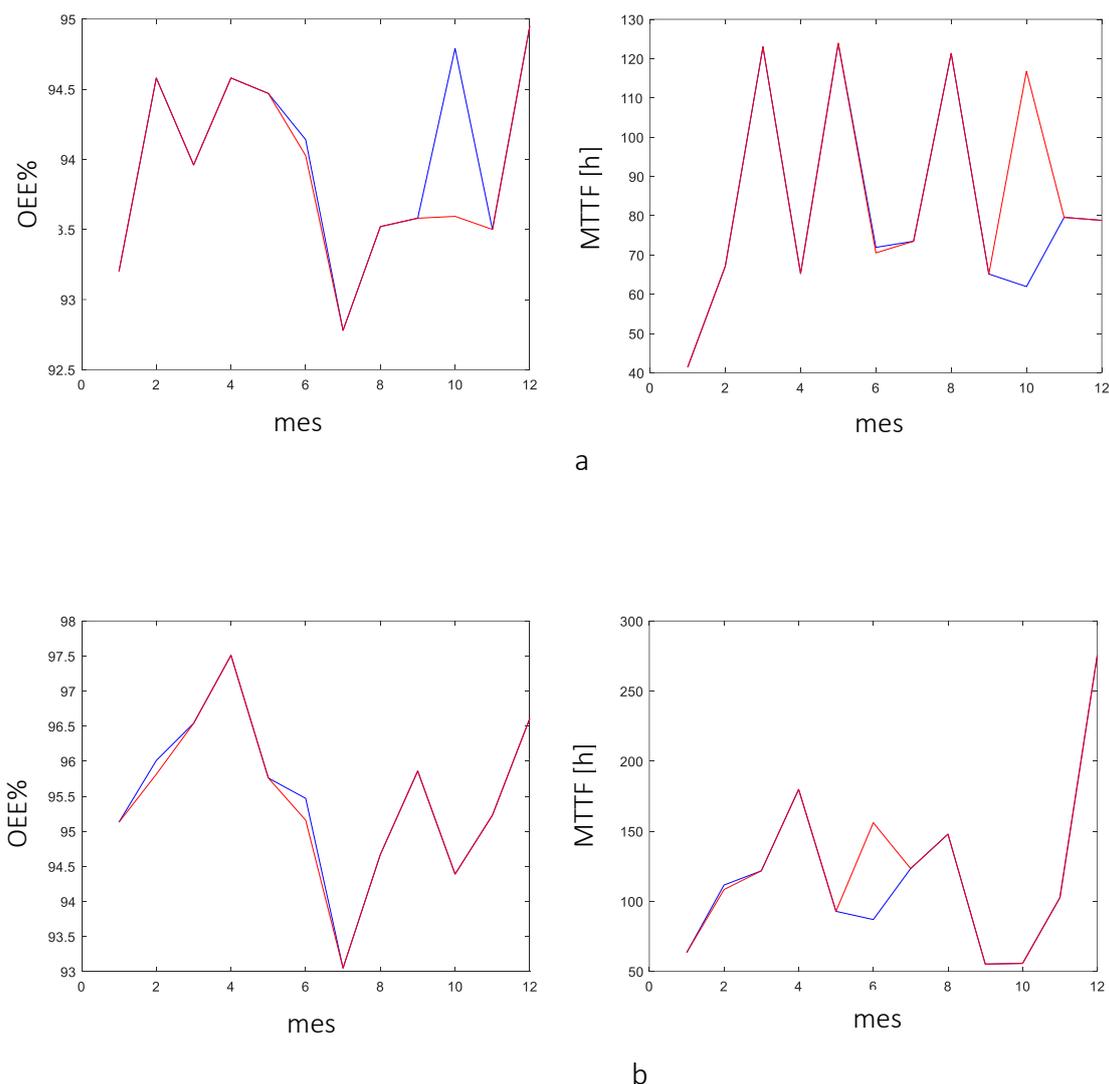


Figura 5.15. Salida, variables medidas (azul) vs predicciones (rojo). (a) M1, (b) M2

Finalmente, se ha completado la técnica de regresión posibilitando predecir los valores futuros de disponibilidad de ambas máquinas, esta vez de forma conjunta agrupando (M1 y M2) principales de producción de papel, mediante otros dos indicadores de mantenimiento cada máquina de fabricación de papel, Tiempo Medio entre Fallos, Mean Time Between Failure (MTBF), y de su Tiempo Medio de Reparación, Mean Time To Repair (MTTR). Se ha usado y entrenado una red neuronal con datos de entrada (predictores) que aúna: diez variables de producción, una variable tiempo y una variable de mantenimiento (número de intervenciones) y dos variables de disponibilidad

(objetivo) de salida, MTBF y MTTR, medidos para los 12 meses del año conjuntamente para ambas máquinas.

La Figura 5.16 muestra la red neuronal artificial “feed-forward” empleada de 12 variables de entrada, 10 capas con neuronas ocultas y 2 capas lineales de neuronas de salida, entrenada con el 70% de los datos mediante el algoritmo de “back-propagation” de regularización bayesiana, el 15% de los datos se ha usado para validación y el 15% restante para test, usando una función de rendimiento error cuadrático medio, MSE, Figura 5.17(a). El resultado de la red entrenada se ha validado como buena según los coeficientes de ajuste de regresión Figura 5.17(b) y Figura 5.17(c), para M1 y M2 conjuntamente.

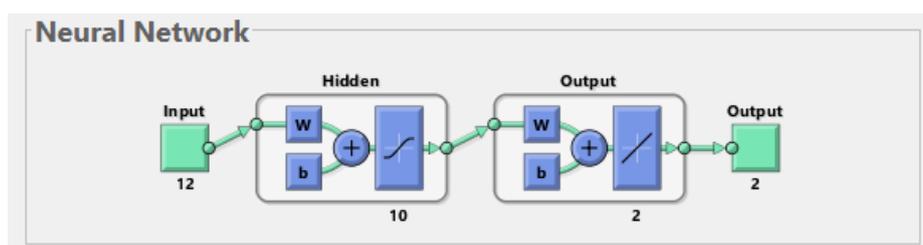
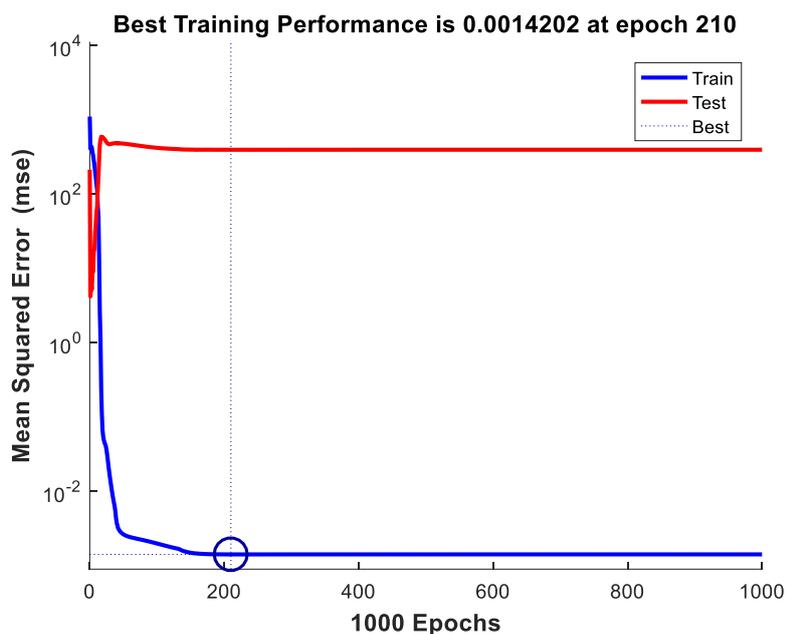
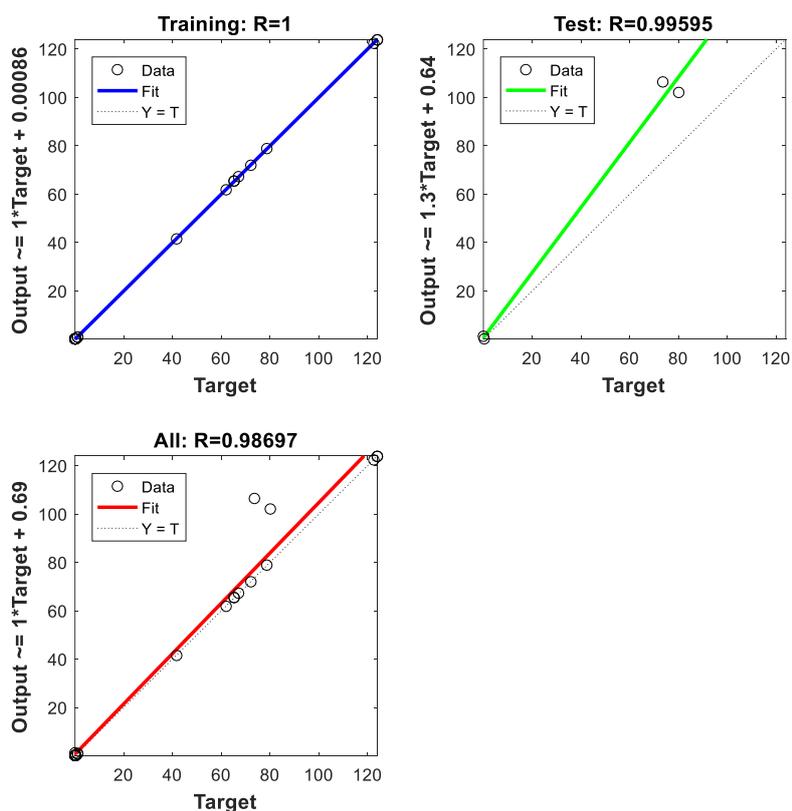


Figura 5.16. ANN de regresión entrenada para las máquinas de papel conjuntas M1+M2



(a)



(b)

Figura 5.17. (a) Entrenamiento de ANN para M1+M2; (b) Ajuste de regresión

El resultado del ajuste se observa cotejando las variables de salida medidas Tiempo Medio Entre Fallos (MTBF) y Tiempo Medio de Reparación (MTTR), en azul, con las previstas por el modelo MTBFp y MTTRp, en rojo. Los resultados del conjunto formado por M1 y M2 de forma agregada, se muestran en la Figura 5.18(a) y la Figura 5.18(b). La red neuronal modelada y entrenada predice el comportamiento en términos de indicadores de mantenimiento que tendrá este conjunto de máquinas principales del área productiva de la planta, en cuanto a los valores de mantenimiento, alimentando el modelo con valores predictores de producción. Al igual que los modelos individuales de red neuronal anterior, conforme se vayan introduciendo mayor número de instancias, la red se volverá a entrenar, refinándose y aumentando su precisión.

En clave de mantenimiento, supone realizar predicciones de fiabilidad y mantenibilidad en función de diez valores característicos de producción, el modelo establecido de este modo permite predecir los valores futuros de los indicadores Tiempo Medio Entre Fallos (MTBF) y Tiempo Medio Hasta Reparación (MTTR), observando comportamiento no lineal en el tiempo, tal y como se muestra en la Figura 5.18(a) y 4.18(b), respectivamente. Se observan oscilaciones del Tiempo Medio Entre Fallos (MTBF) entre un valor medio de 100,3 h con una alta dispersión de $\pm 49,42h$, y un valor medio del Tiempo Medio Hasta el Fallo (MTTF) de 0,48 h de muy alta dispersión $\pm 0,42h$. Concluyendo igualmente que el modelo presentado de regresión puede predecir con buena precisión valores de alta y baja amplitud de oscilación en el tiempo.

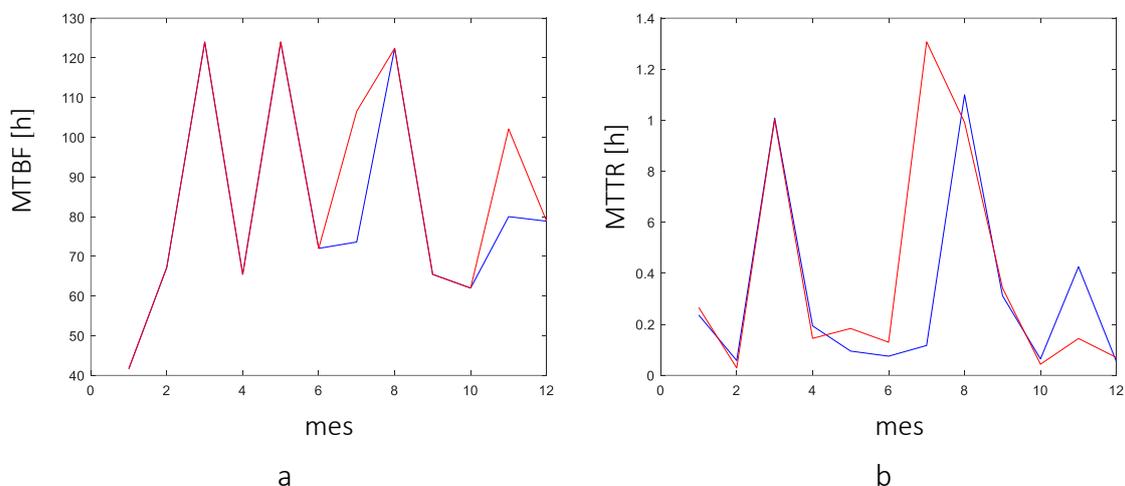


Figura 5.18. Salida, variables medidas (azul) vs predicciones (rojo). (a) MTBF, (b) MTTR

5.3.1. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EN EL ÁMBITO TÁCTICO

Se ha observado que el ajuste es aceptable para el entrenamiento, proporcionado por los valores del coeficiente de regresión R de ajuste global, Figura 5.13(b) y Figura 5.14(b), para ambas máquinas M1 y M2, respectivamente.

Para la máquina M1, se observan valores discrepantes en el ajuste de la validación para el mes 10 y para ambos indicadores Eficiencia Global de Equipo (OEE) y Tiempo Medio Hasta el Fallo (MTTF), esto puede deberse a dos motivos principalmente, el primero de ellos es por sobre-ajuste cuando no se han preparado bien los datos, y existen algunos datos con información de entrada errónea o mal condicionada. El otro motivo se debe a un número bajo de observaciones o con poca información histórica. En este trabajo, se ha verificado que los datos de entrada a la Red Neuronal Artificial (ANN) no presentaban mal condicionamiento, por lo tanto, el problema de sobreajuste se descarta y se contempla como causa principal de la discordancia los pocos datos de entrada, es decir pocas observaciones que se disponían como entradas para la validación. El problema de alimentar la red con pocos datos para entrenar y validar la Red Neuronal

Artificial (ANN) se debe a no disponer, por cuestiones de confidencialidad industrial, de un mayor número de datos, hecho que sin duda mejoraría el aprendizaje de la red y por ende, su eficacia y precisión. No obstante, este hecho ha destacado otro aspecto muy interesante de la Red Neuronal Artificial (ANN), como que la red es fácilmente adaptable y configurable ante una cantidad de observaciones pobre, posibilitando predicciones con mucha precisión, en este caso, 11 aciertos de 12 posibilidades, luego, se ha obtenido un 91,67 % de probabilidad de acierto, en este caso.

En el caso de la máquina M2, se ha observado prácticamente un ajuste total para el indicador de Eficiencia Global de Equipo (OEE), no así para el indicador Tiempo Medio Hasta el Fallo (MTTF), donde se ha evidenciado que en el mes 6 existe una discrepancia en la predicción, la causa, al igual que en M1 se debe a los pocos datos (observaciones) tomados para la validación, obteniéndose la misma precisión que para M1.

Otro aspecto relevante, se ha obtenido como resultado, una precisión aceptable en la predicción de indicadores de disponibilidad, basados exclusivamente en tiempos, usando simplemente como entradas tres variables productivas como variables predictoras (masa papel diariamente producida, densidad superficial de papel y velocidad de la máquina). Abundando más, las dos variables de salida, indicadores de Eficiencia Global de Equipo (OEE) y Tiempo Medio Hasta el Fallo (MTTF), objetivos a predecir se ha calculado simultáneamente, hecho que refleja un valor adicional de este tipo de redes, mayor eficacia computacional, al obtener en una sola simulación la predicción de más de una variable objetivo distinta.

Finalmente, se ha realizado un segundo modelo de red neuronal para predecir los indicadores de fiabilidad Tiempo Medio Entre Fallos (MTBF) y mantenibilidad Tiempo Medio de Reparación (MTTR), esta vez agrupando de forma conjunta las dos máquinas principales del área productiva, M1+M2, observando el comportamiento y precisión equivalentes a los modelos individuales anteriores.

5.4. RESULTADOS DEL SISTEMA ASISTIDO PARA LA DEFINICIÓN OPERATIVA

APLICACIÓN

Se ha conseguido integrar las metodologías de Razonamiento Basado en Casos (CBR) y Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM) con el objetivo final de obtener un diseño personalizado de planes de mantenimiento ajustado a las necesidades reales de la planta industrial y que asista al encargado de mantenimiento en el diseño del mismo. Esta integración de ambas metodologías, implementadas en lenguaje de programación Java, dimanó en la obtención de una aplicación informática independiente para el modelo de RCM conductivo, denominada Mantenimiento Centrado en Fiabilidad conductivo mediante Inteligencia Artificial, Artificial Intelligence Reliability-Centered Maintenance (AIRCM) y diseñada al efecto para ser aplicada en un entorno industrial cualquiera.

En particular la aplicación AIRCM ha sido concebida en dos partes; la primera parte se ha implementado el Análisis de Modos de Fallos, Efectos y Criticidades (FMECA), propia del método de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM), con la metodología de Razonamiento Basado en Casos (CBR) usando el entorno de jCOLIBRI y la segunda parte, donde se ha implementado la política de mantenimiento según el flujograma decisional, Figura 4.7, sobre el contexto operativo del nuevo caso planteado, y por ende se descarta la política de mantenimiento adoptada caso recuperado. Esto se debe a que la política de mantenimiento depende más del contexto operacional donde se ubique el equipo, no así con el fallo, pues estos están más relacionados con el tipo de equipo y la política de mantenimiento con el contexto productivo.

Todo Sistema Basado en Conocimiento, Knowledge-Based System (KBS), como es la metodología de Razonamiento Basado en Casos (CBR) debe tener acceso y modificación a una base de datos donde se almacenen los diferentes casos históricos validados como

exitosos. Esta base de casos lo componen las hojas de trabajo, Figura 4.6, de información FMECA, Figura 4.8, y de decisión RCM, Figura 4.9, una vez aplicada la metodología clásica de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM) con éxito en un entorno productivo. Estas hojas suponen registros de los problemas realmente resueltos y que han completado un plan de mantenimiento. Las hojas de registro se han considerado ya existentes y supondrán la información de entrada para un registro de la base de datos, como base de casos que se ha interconectado a la aplicación AIRCM objeto del presente trabajo. Debido a que habitualmente las hojas de datos se disponen en hojas de cálculo, es fácil volcar la información y su estructura en una nueva hoja de cálculo que compondrá el registro de casos y por lo tanto, la base de casos que necesita la aplicación AIRCM. Esta base de casos es un fichero de valores separados por comas, Comma-separated Values (CSV), en la Tabla 5.3 se evidencian los valores del fichero CSV en forma tabulada, correspondiendo cada columna a los atributos especificados en la Tabla 5.2. Por motivos de espacio, la tabla se muestra dividida en dos partes, (a) y (b), entre su séptima columna (atributo F) y su octava columna (atributo FM).

Tabla 5.2. Atributos de la base de casos. Encabezados de las columnas del fichero de base de datos CSV

<i>ATRIBUTOS</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>TIPOLOGÍA</i>	<i>ATRIBUTOS</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>TIPOLOGÍA</i>
<i>IDP</i>	Identificador del Problema	Valor secuencial de casos. Número entero	FM	Modo de Fallo	Descripción de los modos de fallos que pueden desencadenar la avería. Cadena de caracteres
<i>S</i>	Sección del árbol de máquinas	Código alfanumérico que identifica la sección	FE	Efectos del Fallo	Descripción de los efectos que afectan a la seguridad, a la producción y economía de la planta. Cadena de Caracteres
<i>I</i>	Instalación dentro de la sección del árbol de máquinas	Código alfanumérico que identifica la sección	NPR	Número de Prioridad de Riesgo	Valor real que indica la prioridad en cuanto al riesgo evaluado por el fallo. Es producto de la probabilidad de ocurrencia (O), la severidad (S) y detección (D). Número real
<i>E</i>	Equipo dentro de la instalación en el árbol de máquinas	Código alfanumérico que identifica la sección	PT	Tarea Propuesta	Descripción de las acciones de mantenimiento a llevar a cabo. Cadena de caracteres.
<i>FF</i>	Fallo Funcional	Descripción del fallo que imposibilita la función parcial o total requerida. Cadena de caracteres	MC	Clasificación de Mantenimiento	Política de Mantenimiento a llevar a cabo. Enumerado: Periódico encontrar fallo oculto, Mantenimiento Basado en Operador, Mantenimiento Basado en Condición, Mantenimiento Basado en Tiempo, Mantenimiento No Planeado (Correctivo), Rediseño
<i>IDS</i>	Identificador de la Solución	Valor secuencial de casos. Número entero	II	Intervalo Inicial	Frecuencia de aplicación de las acciones de mantenimiento preventivo sistemático. Número Entero
<i>F</i>	Función Requerida por el equipo	Descripción de la función requerida y sus valores nominales de funcionamiento. Cadena de caracteres	R	Responsable de Mantenimiento	Grupo, Persona o Taller responsable de la correcta ejecución de las tareas de mantenimiento planificadas

Tabla 5.3. Registros del fichero CSV que conforma la base de casos. Atributos {IDP, S, I, E, FF, IDS, F, FM, FE, NPR, PT, MC, II, R}

#IDP	S	I	E	FF	IDS	F	FM	FE	NPR	PT	MC	II	R
1	EW	RESMAS	AXIS	Ajustarse al formato fuera de rango	1	Ajustarse al ancho del formato	Holgura existente entre Husillo (a	Afecta a la presentación del p	72	Sistema de engrase en tuercas	REDISEÑO	X	TM
2	EW	RESMAS	AXIS	No centrar los axis entre sí	2	Centrar todos los axis entre sí sobre ej	Desajuste entre axis 3, 5 y 6 de ai	Se producen atascos.	72	Calibrar AXIS según instruccio	MTO BASADO EN TIEMPO	365	TM/PROD
3	EW	RESMAS	AXIS	No centrar algún axis sobre el resto	3	Centrar todos los axis entre sí sobre ej	Desajuste en mismo axis (3), desc	Se producen atascos.	72	Engrase tuercas AXIS 3 en cond	MTO BASADO EN TIEMPO	30	MP
4	EW	RESMAS	PLEGADORES	No pliega	4	Plegado laterales del paquete v=15 ple	Se producen pérdidas mecánicas	Rompe el paquete y con el tie	360	Ajustar pistón y reguladores de	RESTAURACIÓN	X	TE
5	EW	RESMAS	PLEGADORES	No pliega	5	Plegado laterales del paquete v=15 ple	Mala regulación de las restricci	Desencadena 1.A.1. Rompe e	360	Restaurar palas en aluminio pa	RESTAURACIÓN	X	TM
6	EW	RESMAS	PLEGADORES	No pliega	6	Plegado laterales del paquete v=15 ple	Mal ajuste y desencadenamiento	Desencadena 1.A.1. Rompe e	360	Restaurar tornillería rápida cor	RESTAURACIÓN	X	TM
7	EW	RESMAS	COLA	No dosificar la cola por ninguna tobera	7	Dosificación de cola para el pegado de	Se reproduce cuando se gasta el	Colapso del sistema de cola. f	168	Cargar al inicio de turno el depi	MTO BASADO EN TIEMPO	1 vez c	PROD
8	EW	RESMAS	COLA	No dosificar la cola por ninguna tobera	8	Dosificación de cola para el pegado de	En la BOMBA DE COLA se desgasi	Colapso del sistema de cola. f	168	MECANISMO: Ajustar los tenso	REDISEÑO	X	TM
9	EW	RESMAS	COLA	No dosificar la cola por ninguna tobera	9	Dosificación de cola para el pegado de	En la BOMBA DE COLA se desgasi	Colapso del sistema de cola. f	168	Sistema de recogida de cola de	MTO BASADO EN TIEMPO	1 vez p	PROD
10	EW	RESMAS	COLA	No dosificar la cola por alguna tobera	10	Dosificación de cola para el pegado de	Se atoran las TOBERAS por parti	Colapso del sistema de cola. f	168	Inspección de valores admisibl	MTO BASADO EN CONDICIÓN	7	MP
11	EW	RESMAS	COLA	No dosificar la cola por alguna tobera	11	Dosificación de cola para el pegado de	Se atoran las TOBERAS por desc	Colapso del sistema de cola. f	168	Procedimiento de limpieza NOI	MTO BASADO EN TIEMPO	1	PROD
12	EW	RESMAS	COLA	No dosificar la cola por alguna tobera	12	Dosificación de cola para el pegado de	Se seccionan los cables internos	Colapso del sistema de cola. f	168	Procedimiento de limpieza NOI	MTO BASADO EN TIEMPO	7	PROD
13	EW	RESMAS	COLA	No dosificar la cola por alguna tobera	13	Dosificación de cola para el pegado de	En el MECANISMO del movimien	Se derrama cola en órganos y	168	Procedimiento de mantenimier	MTO BASADO EN TIEMPO	182	TE
14	EW	DESBOBINADOR	CORTAORILLOS	No cortar	14	Realizar el corte del ancho del form	Se desgasta la cuchilla hasta el lí	Mal corte y reemplazo de cuc	280	Modificar cuchilla y contracuc	REDISEÑO	X	TM
15	EW	DESBOBINADOR	CORTAORILLOS	No corta con precisión	15	Realizar el corte del ancho del form	Desgaste fuera de los límites de	Mal corte y reemplazo de cuc	280	A) Sustitución por cuchillas rea	MTO BASADO EN TIEMPO	30	TM
16	EW	DESBOBINADOR	CORTAORILLOS	No corta con precisión	16	Realizar el corte del ancho del form	Se desgasta la contracuchilla. Est	Mal corte y reemplazo de cor	280	A) Sustitución por cuchillas rea	MTO BASADO EN TIEMPO	30	TM
17	EW	DESBOBINADOR	CORTAORILLOS	No corta con precisión	17	Realizar el corte del ancho del form	Al producirse el desgaste (en cu	Aceleración de desgastes en c	280	A) Sustitución por cuchillas rea	MTO BASADO EN TIEMPO	30	TM
18	EW	E/S PALETIZADOR	PALETIZADOR	En la carga el palet vira al pasar por la ci	18	Carga y posicionamiento automático	La cinta intermedia no está bien	Tropieza el palet.	280	Eliminar holgura en cintas trans	RESTAURACIÓN	X	TM
19	EW	E/S PALETIZADOR	PALETIZADOR	No posiciona correctamente el palet.	19	Carga y posicionamiento automático	El mecanismo de ajuste de la fot	No posiciona bien los paquete	280	A) Restaurar el sistema de posi	REDISEÑO	X	TM
20	EW	E/S PALETIZADOR	PALETIZADOR	No posiciona correctamente el palet.	20	Carga y posicionamiento automático	El mecanismo de ajuste de la fot	No posiciona bien los paquete	280	Engrase cadenas de cintas x dis	MTO BASADO EN TIEMPO	90	TM
21	EW	E/S PALETIZADOR	PALETIZADOR	No transferir el palet cargado.	21	Transferir palets cargados mediante	El palet cargado tropieza en las	c Se produce caída de la pila y r	640	A) Bajar nivel cinta rodillos inte	REDISEÑO	X	TM
22	EW	E/S PALETIZADOR	PALETIZADOR	No transferir el palet cargado.	22	Transferir palets cargados mediante	Se produce un retardo de transp	Provoca el atasco del palet y	640	A) Ajuste de nivel y posición cinta:	MTO BASADO EN TIEMPO	30	TM
23	EW	RESMAS	PISONES	No adecuación de la presión mínima seg	23	Los pisones deben ajustarse al alto del	El fallo se reproduce al existir un	Se produce una deformación	35	Calibración AXIS 1 y 2 (según pr	MTO BASADO EN TIEMPO	365	TM
24	EW	RESMAS	PISONES	No adecuación de la presión mínima seg	24	Los pisones deben ajustarse al alto del	El fallo se reproduce al existir un	Se produce una deformación	35	Inspección de valores admisibl	MTO BASADO EN CONDICIÓN	7	MP
25	EW	RESMAS	FRENOS	No realiza la frenada en el tiempo exigid	25	Realizar la frenada del motor de accto	El fallo se reproduce en el mome	Esto provoca una pérdida en i	640	A) Inspeccionar el estado del di	MTO BASADO EN CONDICIÓN	30	TE
26	EW	RESMAS	LIMITADOR DE PAR	No realiza la frenada en el tiempo exigid	26	Realizar una adaptación durante el arr	El mecanismo de fallo típico se r	Los paquetes quedan con env	75	Restaurar cadenas originales di	RESTAURACIÓN	X	TM
27	EW	RESMAS	BARRAS DESPLEGAD	No ajustar la longitud de desenrollado c	27	Predesenrollar la envoltura a la longit	El mecanismo de fallo típico se r	Los paquetes quedan con env	75	A) Nivelar barras desplegadas:	MTO BASADO EN TIEMPO	90	TM
28	EW	RESMAS	BARRAS DESPLEGAD	No ajustar la longitud de desenrollado c	28	Predesenrollar la envoltura a la longit	El mecanismo de fallo se reprodu	Se descentra el embalaje resp	250	Reemplazar correa de transmis	RESTAURACIÓN	X	TM
29	EW	RESMAS	BARRAS DESPLEGAD	No centrar el embalaje desplegado sobre	29	Predesenrollar la envoltura a la longit	El mecanismo de fallo se reprodu	Se descentra el embalaje resp	250	Inspección del estado de deteri	MTO BASADO EN CONDICIÓN	7	MP
30	EW	RESMAS	BARRAS DESPLEGAD	No centrar el embalaje desplegado sobre	30	Predesenrollar la envoltura a la longit	El sistema de protecciones magn	Para la máquina hasta que se	560	Ajustar la sensibilidad del limita	RESTAURACIÓN	X	TE
31	EW	RESMAS	CUADRO B.T.	El sistema de alarma por Fallo Magnetot	31	Protección MagnetoTérmica de la inst	Se produce un salto de la protecc	Para la rulliera	560	Ajustar la sensibilidad del limita	RESTAURACIÓN	X	TE
32	EW	RESMAS	CUADRO B.T.	El sistema de alarma por Fallo Magnetot	32	Protección MagnetoTérmica de la inst	La desnivelación de la pluma pro	Esfuerzos innecesarios por el	12	A) Nivelación de la sujeción de	RESTAURACIÓN	X	TM
33	EW	DESBOBINADOR	CARGA BOBINAS	Asistencia parcial en manejo de carga	33	Asistir en la carga de bobinas de emba	El fallo se reproduce cuando la f	Rotura de la plataforma del o	216	Mejorar soporte de fotocélula	RESTAURACIÓN	X	TE
34	EW	DESBOBINADOR	PROTECCIÓN	Subida descontrolada	34	Subida de plataforma elevadora de ali	El fallo se reproduce cuando la f	Rotura de la plataforma del o	216	Inspección: A) Comprobar ajus	MTO BASADO EN TIEMPO	7	MP
35	EW	DESBOBINADOR	PROTECCIÓN	Subida descontrolada	35	Subida de plataforma elevadora de ali							

Este epígrafe se ha dividido en 3 fases, según orden cronológico: la preparación de la base de casos usada, el diseño e implementación de la aplicación AIRCM y el uso de la misma para resolver un nuevo caso planteado posibilitando la aplicabilidad del método RCM conductivo mediante la ejecución de la aplicación AIRCM.

5.4.1. BASE DE CASOS

Para este trabajo se ha preparado una base de casos con un total de 35 casos, Tabla 5.3, mediante fácil volcado de datos desde las hojas de trabajo correspondientes a 35 problemas realmente ocurridos y resueltos con éxito bajo la metodología clásica de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM) en una máquina concreta dentro del área productiva resultado del módulo estratégico 1. La máquina está identificada con el código de Sección “EW”, resultado del módulo táctico 2. Esta máquina se descompone conforme a un árbol de máquina en formato de jerarquía (Sección, Instalación, Equipo), para localizar la zona donde ocurre el fallo.

5.4.2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN FIABILIDAD CONDUCTIVO: APLICACIÓN

Una vez establecida una base de datos con los atributos estructurados se comienza la implementación de la aplicación informática AIRCM, usando el lenguaje de programación Java bajo el entorno eclipse. En la primera parte del código se ha usado el entorno jCOLIBRI para implementar la metodología CBR con las librerías específicas diseñadas al efecto. En la segunda parte se ha implementado el código mediante sentencias condicionales para establecer la política de mantenimiento según el diagrama de decisión RCM, para el contexto operacional del nuevo caso presentado. Para implementar el código se ha usado el entorno de desarrollo integrado, Integrated Development Environment (IDE), eclipse [Eclipse, 2019], ya que jCOLIBRI presenta un

armazón preparado para este entorno mediante una perspectiva destinada al efecto, como se puede apreciar en la Figura 5.19.

El diseño se ha dividido en cuatro fases: configuración, preciclo, ciclo y postciclo. En la **configuración** se ha establecido un mapeado entre los atributos de la base de casos del fichero CSV y las variables computacionales de la aplicación informática, se hace notar la correspondencia entre los atributos de la base de casos, Tabla 5.2, y las variables computacionales de la aplicación, recuadro central rojo de la Figura 5.19, donde se distinguen entre variables descriptoras del problema “d.” y variables descriptoras de la solución “s.”. El mapeado completo se puede ver en la Tabla 5.4. Este se realiza a través de dos ficheros XML (`caseStructure.xml` y `plainTextConnectorConfig.xml`) dentro de carpeta `config`, parte izquierda de Figura 5.19, o mediante asistencia de jCOLIBRI asignando encabezados, mediante un desplegable de variables, por ejemplo `d.CaseID`, para cada columna, en el ejemplo `d.CaseID` se ha asignado a la primera columna. En cuanto a la persistencia o almacenamiento en memoria, se debe indicar la ubicación de la base de casos mediante su dirección en memoria, como se puede observar en la Figura 5.19. sobre el archivo que la contiene `RCM_EW.csv`. La última parte de configuración se basa en el tercer archivo XML que se puede observar dentro de la carpeta `config` de la misma figura, denominado `similarityConfig.xml`, el cual se genera desde el asistente de jCOLIBRI, como puede observarse en la Figura 5.20.

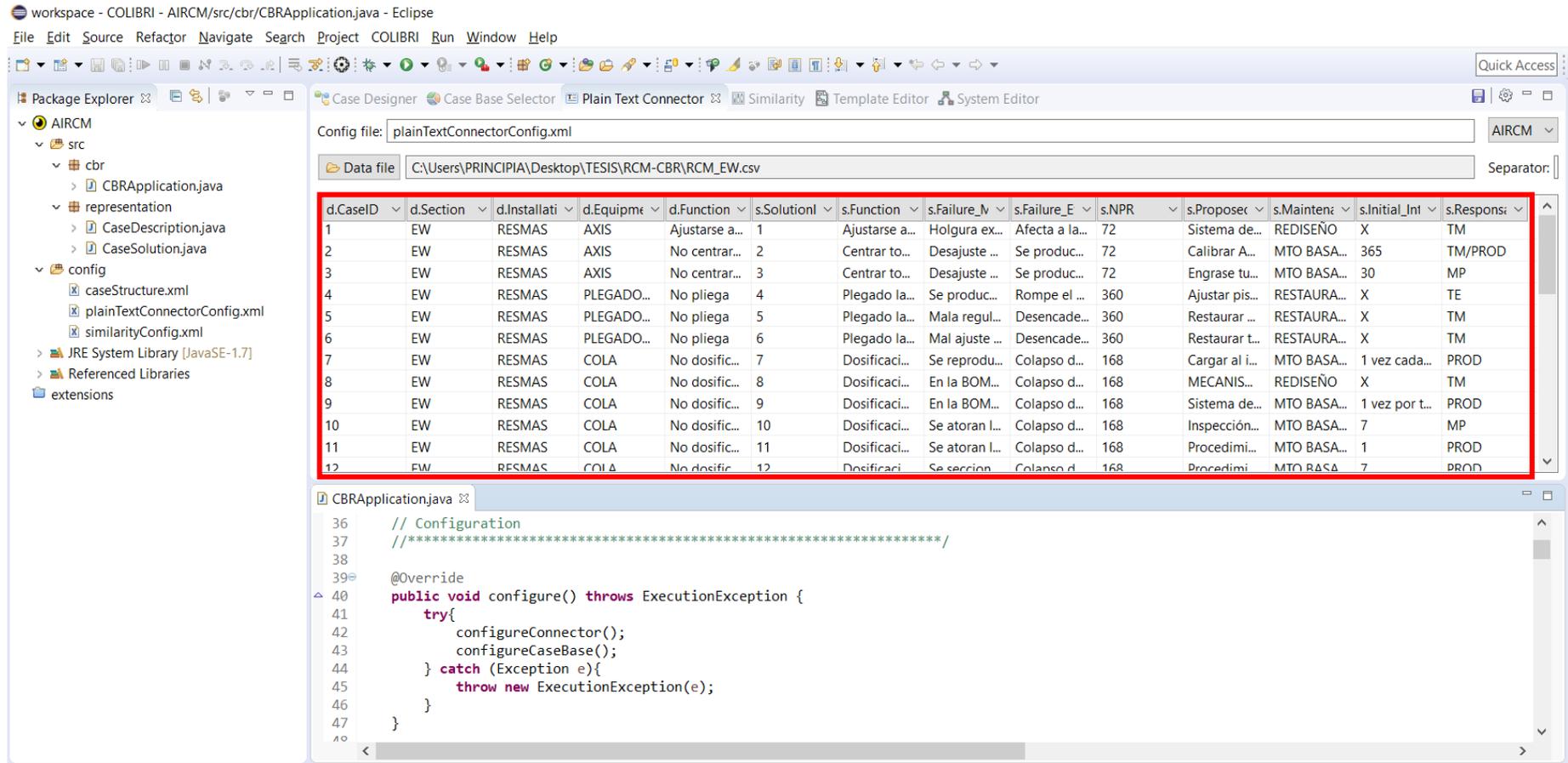


Figura 5.19. Entorno de desarrollo Java en el IDE eclipse bajo la perspectiva jCOLIBRI

Case Designer Case Base Selector Plain Text Connector Similarity Template Editor System Editor

Config file: similarityConfig.xml + Create Similarity Function AIRCM

Attribute	Similarity Function	Wei...
Case		
Description	jcolibri.method.retrieve.NNretrieval.similarity.global.Average	
CaseID	Nothing	1.00
Section	jcolibri.method.retrieve.NNretrieval.similarity.local.MaxString	0.10
Installation	jcolibri.method.retrieve.NNretrieval.similarity.local.MaxString	0.10
Equipment	jcolibri.method.retrieve.NNretrieval.similarity.local.MaxString	0.10
Functional_Failure	jcolibri.method.retrieve.NNretrieval.similarity.local.MaxString	0.70
Justification		
Result		
Solution	Nothing	
SolutionID	Nothing	1.00
Function	Nothing	1.00
Failure_Mode	Nothing	1.00
Failure_Effect	Nothing	1.00
NPR	Nothing	1.00
Proposed_Task	Nothing	1.00
Maintenance_Classify	Nothing	1.00
Initial_Interval	Nothing	1.00
Responsabile	Nothing	1.00

Figura 5.20. Configuración de la función de similitud del método NN bajo la perspectiva jCOLIBRI

En esta figura se ha configurado la similitud del método usado, en este caso vecinos más próximos (NN), donde se puede observar que las variables a considerar para comparación de casos son las tres propias de localización dentro del árbol de máquinas (Sección, Instalación, Equipo) y la propia de la descripción del problema (Fallo Funcional). De igual modo, estas variables se han combinado entre sí para obtener una media global, según la variable escogida, ponderando las mismas para dar más énfasis a aquellas variables que se han considerado más importantes, conforme a la ecuación (1). En este caso se ha decidido ponderar con un 70% la variable fallo funcional considerándola la más importante, ya que es lo que trata de resolver la aplicación, no obstante, se debe tener en cuenta el equipo y su ubicación dentro de una máquina, para resolver un posible empate entre descripciones parecidas, en este caso supone un 30% de ponderación, distribuyéndose equitativamente al 10% cada variable de sección, instalación y equipo. La función de similitud local usada para todas las variables es la función MaxString, para comparar la similitud entre los textos del caso nuevo planteado (objetivo) y todos los casos disponibles en la base de casos.

Tabla 5.4. Mapeado de atributos de la base de casos y variables implementadas en la aplicación AIRCM

ATRIBUTOS BASE DE CASOS (CSV)	VARIABLES DE AIRCM	DOMINIO o ESPACIO DE:
IDP	CaseID	Descripción
S	Section	Descripción
I	Installation	Descripción
E	Equipment	Descripción
FF	Functional_Failure	Descripción
IDS	SolutionID	Soluciones
F	Function	Soluciones
FM	Failure_Mode	Soluciones
FE	Failure_Effect	Soluciones
NPR	NPR	Soluciones
PT	Proposed_Task	Soluciones
MC	Maintenance_Classify	Soluciones
II	Initial_Interval	Soluciones
R	Responsabile	Soluciones

En las fases **preciclo** y **postciclo** se han cargado los casos antes de ejecutar el ciclo y se han liberado los recursos una vez ejecutado el ciclo, respectivamente, mediante conectores a la base de casos. No obstante, la fase correspondiente al **ciclo** contiene el flujo de funcionamiento lógico de la metodología CBR, Figura 4.10, y es ejecutado mediante consultas. Este ciclo presenta dos etapas, la primera aplica el flujo de Razonamiento Basado en Casos (CBR) sobre la parte de Análisis de Modos de Fallos, Efectos y Criticidades (FMECA) de la metodología de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM), esto es recuperación de modos de fallos dentro de la base de casos comparándolos con el nuevo problema planteado mediante consulta. La segunda etapa trata de reaplicar las acciones de mantenimiento, reevaluando el Número de Prioridad de Riesgo (NPR), la instrucción de la tarea de mantenimiento, la política o clase de mantenimiento, intervalo y responsable asignado.

Primera etapa. FMECA basado en CBR

Recuperar: En esta etapa del código fuente Java usando librerías jCOLIBRI se ha implementado el método NN. Ver código en la Figura 5.21. En primer lugar, se ha obtenido la configuración de similitud vista en la fase de configuración, Figura 5.20 para posteriormente usar la misma en la recuperación de casos, según una consulta (*query*) introducida en el método ciclo como parámetro de entrada. Esta consulta corresponde a la descripción del problema del nuevo caso planteado. En la segunda sentencia del código se ha almacenado en la variable *eval* la colección de todos los casos recuperados, donde se ha añadido una puntuación para cada caso en función de su similitud con la consulta.

```
public void cycle(CBRQuery query) throws ExecutionException {
  /*****RETRIEVE: execute NN*****/
  NNConfig simConfig = getSimilarityConfig();
  Collection<RetrievalResult> eval =
  NNScoringMethod.evaluateSimilarity(casebase.getCases(), query, simConfig);
}
```

Figura 5.21. Extracto de código Java/jCOLIBRI para el método ciclo (*cycle*) y la actividad RECUPERACIÓN

Reutilizar: En esta etapa del código se ha implementado la selección de los k casos más próximos por similitud al nuevo caso planteado, según se evidencia en la primera sentencia del extracto de código mostrado en la Figura 5.22. En este trabajo se ha considerado seleccionar los k=3 casos más similares, considerado como valor idóneo dentro del rango [1, 4] como se justificó en el apartado 4.4.2. De esta forma se ha posibilitado al usuario elegir entre los tres casos más similares, tomando él mismo la decisión final sobre la similitud del nuevo caso planteado respecto a la base de casos.

En la primera sentencia la variable *selectedcases* almacena los tres casos más próximos por orden de similitud de los casos recuperados en la colección *eval* anterior, mientras que la segunda sentencia la variable *choice* almacena los tres casos seleccionados pero ordenados en una tabla para presentarla por pantalla al usuario de la aplicación mediante una ventana emergente. No obstante, esta ventana, además de presentar por orden descendente los tres casos más similares, permite que el usuario decida qué caso finalmente se selecciona entre los tres presentados, posibilitando que el usuario decida cual se adapta mejor al problema planteado, como se observa en el tercer bloque del código mediante el condicional Buy or Quit.

```

/*****REUSE: Select Cases*****/
Collection<CBRCASE> selectedcases = SelectCases.selectTopK(eval,3);

UserChoice choice =
DisplayCasesTableMethod.displayCasesInTableBasic(selectedcases);

if(BuyOrQuit.buyOrQuit(choice))
JOptionPane.showMessageDialog(null,"Finalizado - El usuario ha elegido el
caso "+choice.getSelectedCase());
else
JOptionPane.showMessageDialog(null,"Finalizado por decisión del usuario");

```

Figura 5.22. Extracto de código Java/jCOLIBRI para el método ciclo (cycle) y la actividad REUTILIZAR jCOLIBRI

Revisar: En esta etapa del código se ha permitido al usuario la revisión del caso seleccionado mediante la creación de un caso, mediante la variable *bestCase* y copiado

del seleccionado (*choice*), como se puede apreciar en la primera sentencia del extracto de código de la Figura 5.23.

La revisión propiamente se basa en modificar los valores contenidos en los atributos del identificador, de la descripción *newCaseID* y de la solución *newSolutionID*, del caso *bestCase*, de tal forma que se prepara un nuevo caso con identificación secuencial al último caso de la base de casos.

```

/***** REVISE *****/
// Lets store only the best case (the choose case by user)
CBRCase bestCase = choice.getSelectedCase();

//Define new ids for the compound attributes.
Integer newCaseID = casebase.getCases().size()+1;
JOptionPane.showMessageDialog(null,"El nuevo número identificador de caso
de descripción es Caso Descripción: " + newCaseID);
Integer newSolutionID = casebase.getCases().size()+1;
JOptionPane.showMessageDialog(null,"El nuevo número identificador de caso
de descripción es Caso Solución: " + newSolutionID);

//Add the new IDs Case & Solution in the the new case
((CaseDescription) bestCase.getDescription()).setCaseID(newCaseID);
((CaseSolution) bestCase.getSolution()).setSolutionID(newSolutionID);

```

Figura 5.23. Extracto de código Java/jCOLIBRI para el método ciclo (*cycle*) y la actividad REVISAR

Segunda etapa. RCM conductivo dentro de la actividad de Revisión del ciclo CBR

En esta segunda etapa, estando dentro de la actividad de revisión dentro del ciclo CBR, se ha implementado el código para modificar los valores de aquellos atributos que involucran al contexto operativo por el método de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM), es decir, que en lugar de recuperar los valores de los atributos de toda la solución, sólo se recuperan aquellos asociados al Análisis de Modos de Fallos, Efectos y Criticidades (FMECA) pero el resto de valores de los atributos serán modificados (revisados) por el usuario según la metodología decisional de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM) mediante el diagrama de decisión, Figura 4.7, posibilitando que el contexto operacional sea reconsiderado nuevamente a la hora de diseñar la solución del nuevo caso planteado.

El citado diagrama de decisión ha sido implementado en código Java mediante sentencias condicionales, para que mediante preguntas establecidas se revise la solución, de ahí el nombre de conductivo del método RCM. Los atributos cuyos valores se han revisado mediante la implementación del RCM conductivo son: Número de Prioridad de Riesgo (NPR) -a través de sus factores de ocurrencia, severidad y detección-, Tarea Propuesta (PT), Intervalo Inicial (II), Responsable (R), según extracto de código mostrado Figura 5.24.

```
String sc0;
sc0=JOptionPane.showInputDialog("Introduzca la probabilidad de ocurrencia
del fallo de 0 (bajo) a 10 (muy alto): ");
Double o = Double.parseDouble(sc0); // ocurrence variable
sc0=JOptionPane.showInputDialog("Introduzca el índice de severidad de la
avería potencial 0 (inapreciable) a 10 (muy alta): ");
Double s = Double.parseDouble(sc0); // severity variable
sc0=JOptionPane.showInputDialog("Introduzca la probabilidad de NO ser
detectado el fallo de 0 (totalmente detectable) a 10 (indetectable): ");
Double d = Double.parseDouble(sc0); // detection variable
Double newNPR = o*s*d;
JOptionPane.showMessageDialog(null,"El nuevo Número de Prioridad de Riesgo
es NPR= " + newNPR);
((CaseSolution) bestCase.getSolution()).setNPR(newNPR);

sc0=JOptionPane.showInputDialog("Introduzca el nuevo intervalo de
mantenimiento, se aconseja 80% de MTBF, en días: ");
Integer newInitial_Interval= Integer.parseInt(sc0);
((CaseSolution)
bestCase.getSolution()).setInitial_Interval(newInitial_Interval);

sc0=JOptionPane.showInputDialog("Introduzca el nuevo responsable de
mantenimiento {TM, TE, MP, PROD}: ");
String newResponsabile= sc0;
((CaseSolution) bestCase.getSolution()).setResponsabile(newResponsabile);

sc0=JOptionPane.showInputDialog("La actual tarea de mantenimiento es "
+((CaseSolution) bestCase.getSolution()).getProposed_Task()+ ". Introduzca
la nueva tarea propuesta de mantenimiento: ");
String newProposed_Task= sc0;
((CaseSolution) bestCase.getSolution()).setProposed_Task(newProposed_Task);
```

Figura 5.24. Extracto de código Java del método *cycle* y la actividad REVISAR (2ª etapa) RCM conductivo

Por último, se ha aplicado la nueva política de mantenimiento o Clasificación de Mantenimiento (MC), obedeciendo al diagrama de decisión RCM y conduciendo al usuario a través de las preguntas para obtener como respuesta la acción de mantenimiento a aplicar en dicho contexto, según se atisba en extracto parcial del código

que implementa el diagrama de decisión RCM, Figura 5.25, donde en la última sentencia se aplica la clasificación de mantenimiento para el nuevo caso revisado.

```
String newMaintenance_Classify= ((CaseSolution)
bestCase.getSolution()).getMaintenance_Classify(); //initial value
Maintenance Classify from CBR case recovery & pre-RCM criteria process

sc0=JOptionPane.showInputDialog("¿El fallo funcional afecta a dispositivos
de seguridad o redundantes? (SI/NO): ");
String R1=sc0;
if (R1.equals("SI")) {
sc0=JOptionPane.showInputDialog("¿Puede un fallo oculto detectarse mediante
inspección o pruebas? (SI/NO): ");
String R2=sc0;
if (R2.equals("NO")) {
sc0=JOptionPane.showInputDialog("¿Existe riesgo significativo que
afecte a la seguridad, el medio ambiente o para la operación? (SI/NO): ");
String R3=sc0;
if (R3.equals("NO")) {
sc0=JOptionPane.showInputDialog("¿Existe una tarea de
mantenimiento correctivo viable en costes? (SI/NO): ");
String R7=sc0;
if (R7.equals("SI")){
newMaintenance_Classify="MC: Mantenimiento Correctivo. Permitir
que ocurra la avería.";
}
else {
newMaintenance_Classify="RD: Rediseño del activo o del
procedimiento operativo o combinación de ambos";
}
}
}
}
// (... sigue el código)

((CaseSolution)
bestCase.getSolution()).setMaintenance_Classify(newMaintenance_Classify);
//final value Maintenance Classify post-RCM criteria process

//Print the new case
JOptionPane.showMessageDialog(null,"Nuevo caso añadido en la Base de Casos
con la ID" + ((CaseDescription) bestCase.getDescription()).getCaseID() +":
"+ bestCase);
```

Figura 5.25. Extracto parcial del algoritmo que implementa diagrama decisional RCM en la actividad REVISAR (2ª etapa) del método cycle, para asignar el valor final de la clasificación de mantenimiento

La parte final del ciclo compete a la actividad de Retener: En este caso, el código de la Figura 5.26 sólo presenta una única sentencia donde se ha almacenado el nuevo caso

elegido y revisado *bestCase* en la base de casos añadiendo una instancia más en el fichero RCM_EW.csv.

```
/****** RETAIN (LEARNT CASE)*****/  
// Only the choose case is stored in CasesBase  
StoreCasesMethod.storeCase(casebase,bestCase);
```

Figura 5.26. Extracto de código Java/jCOLIBRI para el método ciclo (*cycle*) y la actividad *RETENER*

5.4.3. USO DE LA APLICACIÓN PARA RESOLVER MEDIANTE ASISTENCIA UN NUEVO CASO DE FALLO

Partiendo de una situación en la que se ha lanzado el sistema de asistencia al diseño y planificación completo, esto es, se ha aplicado el módulo estratégico M1, obteniéndose como resultado un área productiva de interés para la dirección, posteriormente para esa área productiva se aplica el módulo táctico M2 por parte de los mandos intermedios obteniendo como resultado una máquina (Sección) a la que debe aplicarse el diseño de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM) para mejorar la fiabilidad y mantenibilidad de la misma. En este instante, en lugar de aplicar un clásico diseño mediante metodología de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM), se posibilita el uso de RCM conductivo mediante la aplicación AIRCM diseñada en 4.2. para tal fin, con las ventajas de minimizar tiempo dedicado por usuarios responsables del diseño y errores humanos inherentes al manejo de bases de casos extensas.

En este punto, se ha lanzado la aplicación AIRCM sobre la máquina identificada como sección “EW”, resultado del módulo táctico M2. Una vez preparada la base de casos, según el epígrafe 4.1., los datos que se necesitan como información de entrada serán cuatro, como se puede observar en la Figura 5.27. Las tres últimas variables localizan la zona donde se ha producido el problema a analizar, mientras que con la primera variable de entrada se ha ingresado la descripción textual del problema. Esto se ha preparado así, porque los usuarios (operadores de máquinas) que solicitan una intervención de

mantenimiento deben cursar una petición de trabajo, PT, que no es más que el inicio de una Orden de Trabajo (OT), de la aplicación de Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador (GMAO) que usa el departamento de mantenimiento. Se aprovecha la equivalencia existente entre la descripción de una petición de trabajo y el fallo funcional de un equipo, atributo FF, de la Tabla 5.2.

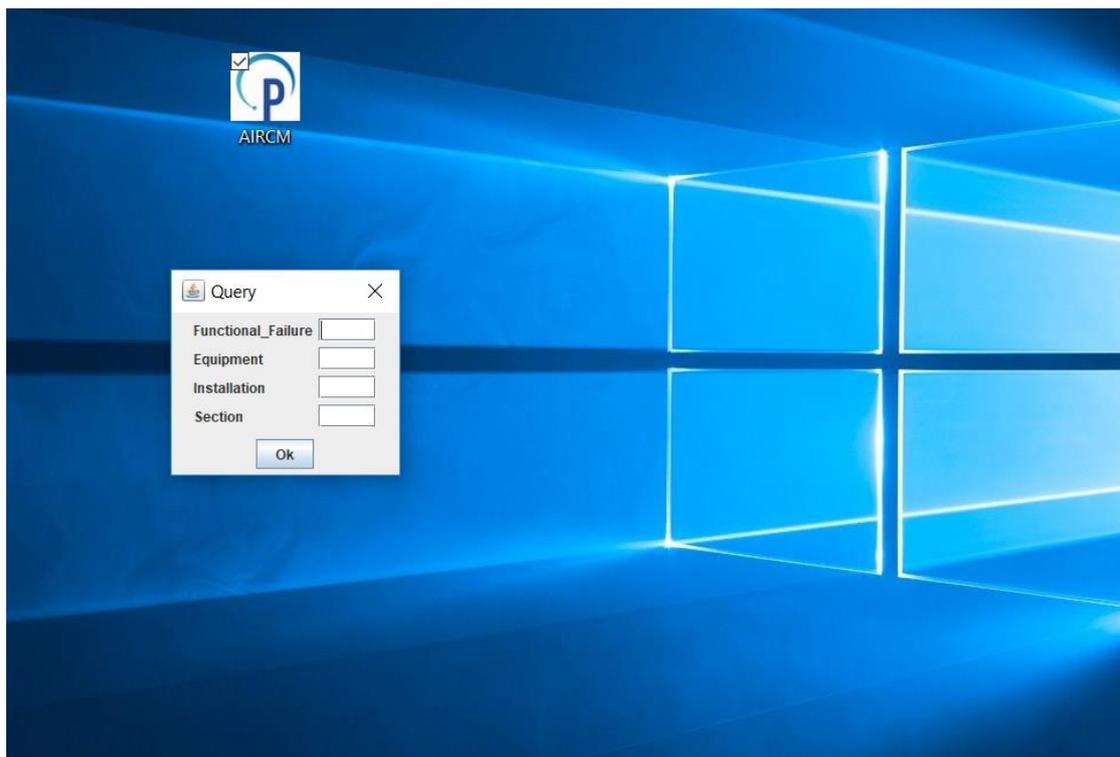


Figura 5.27. Icono de lanzamiento de la aplicación AIRCM (arriba) y ventana inicial para información de entrada ejecutándose en sistema operativo Windows 10

Se ha introducido la información de entrada del nuevo problema planteado sobre la ventana de consulta (query) de la Figura 5.28, describiendo el problema como Fallo Funcional: “No centran los axis” para el equipo AXIS, para el Equipo: “AXIS” dentro de la Instalación: “RESMAS” y Sección: “EW”. Se ha obtenido los tres casos recuperados similares al problema planteado y ordenados por orden descendente de similitud. Tal como se observa en la tabla de la Figura 5.28, el caso identificado como ID=2 de la Base de Casos es el más similar al problema planteado, como se puede apreciar, los casos ID=3

e ID=1 serán los segundo y tercero más similares de entre los encontrados en la base de casos. No obstante, el usuario de la aplicación podrá optar por el caso que mejor se adapte de los tres presentados, ya que le permite ver además otras variables como modos de fallo o efectos del fallo que completan el Análisis de Modos de Fallos, Efectos y Criticidades (FMECA). De esta forma, se consiguen recuperar casos similares y ejercer un análisis de modos de fallo, efectos y criticidades más rápido y simple que realizándolo de nuevo, además de agregar el conocimiento existente de análisis previos de contrastado éxito.

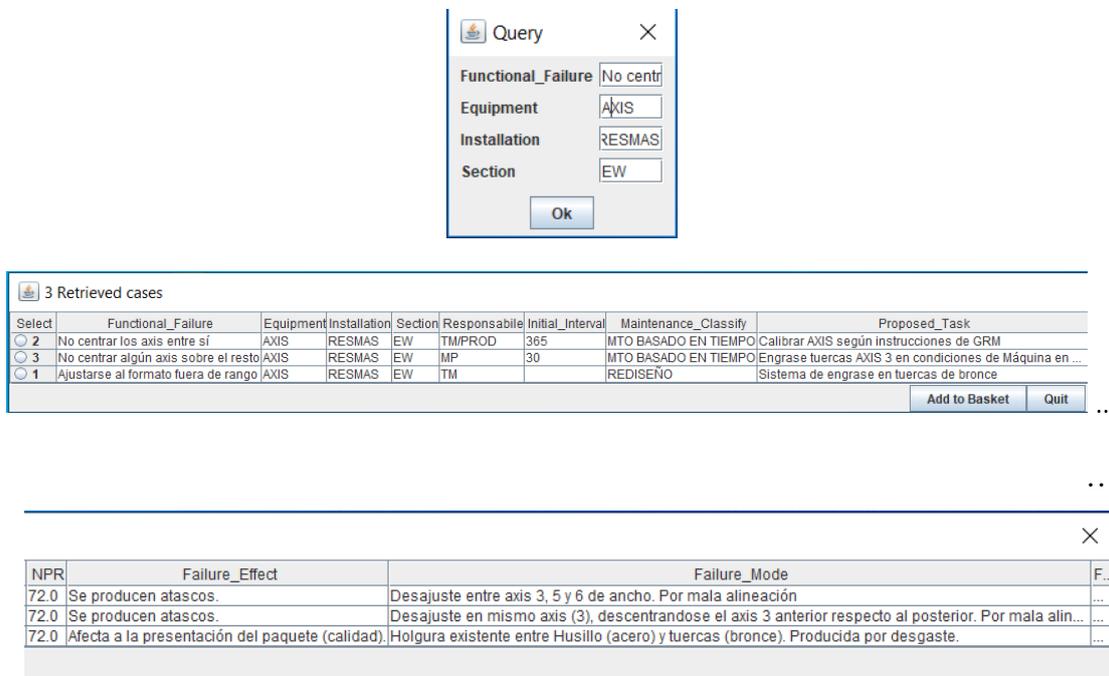


Figura 5.28. Entrada de datos del problema (arriba) y ventana de salida con los 3 casos más similares

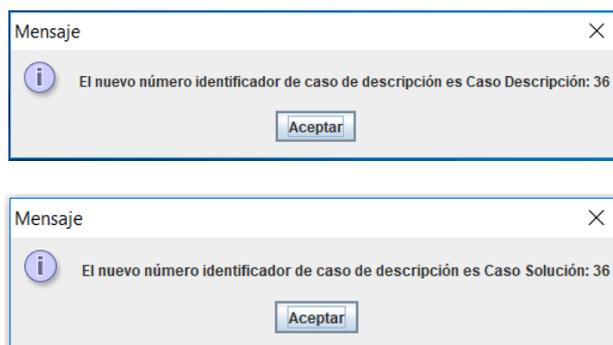


Figura 5.29. Ventana de salida con el nuevo caso elegido y pendiente de revisión

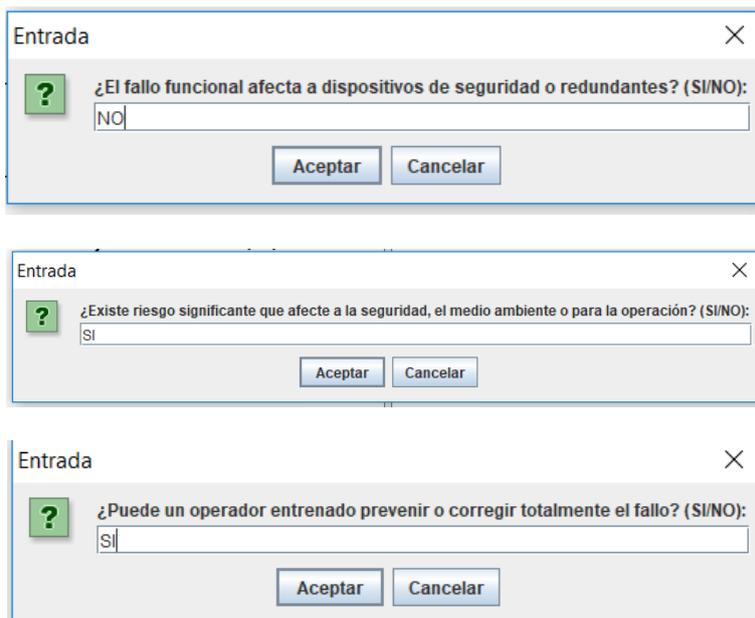
Una vez, el usuario ha elegido el caso que más se adapta a las necesidades del nuevo caso o problema planteado, selecciona él mismo pulsando en el atributo *Select* de los tres presentados por pantalla, en este trabajo se ha optado por el primero, ID=2, ya que es el más similar al problema planteado. Obteniéndose como salida el caso recuperado ID=2 y se comienza la etapa de revisión, asignando el caso ID=36 como caso adicional a los 35 casos existentes en la base de casos, Figura 5.29.

Continuando con el proceso de revisión, de inmediato comienza la segunda etapa del proceso RCM conductivo, mediante la revisión de la información contextual del nuevo problema, tal y cómo se muestra en la Figura 5.30. Con los datos de ocurrencia, severidad y no detectable introducidos se calcula automáticamente el nuevo Número de Prioridad de Riesgo (NPR).

La segunda etapa de revisión comprende redefinir la nueva política o clase de mantenimiento siguiendo el diagrama RCM de forma conducida, es decir, se ha guiado al usuario mediante las preguntas del diagrama, según se observa en la Figura 5.31, donde el usuario responde las preguntas y se obtiene como salida la política de mantenimiento. En este trabajo, la clasificación de mantenimiento obtenida es el **Mantenimiento por Operador**, completándose así la solución del caso elegido, ver última imagen de la Figura 5.31.



Figura 5.30. Ventanas de revisión de datos para el nuevo caso elegido, mediante preguntas del contexto operativo



Entrada

¿El fallo funcional afecta a dispositivos de seguridad o redundantes? (SI/NO):
NO

Aceptar Cancelar

Entrada

¿Existe riesgo significativo que afecte a la seguridad, el medio ambiente o para la operación? (SI/NO):
SI

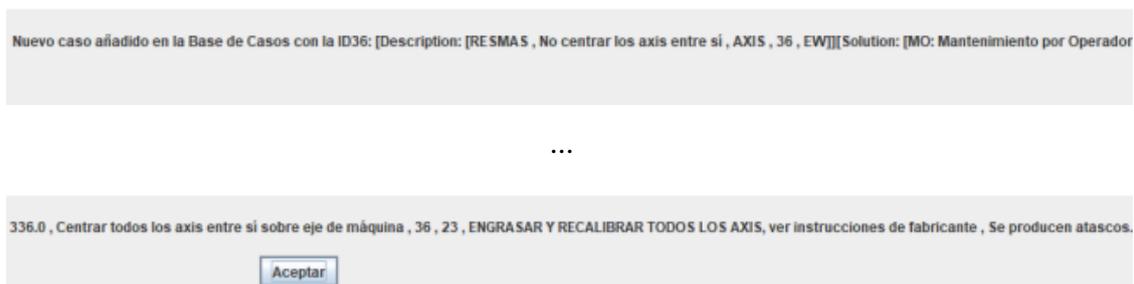
Aceptar Cancelar

Entrada

¿Puede un operador entrenado prevenir o corregir totalmente el fallo? (SI/NO):
SI

Aceptar Cancelar

Mensaje final con el nuevo caso incorporado en la base de casos:



Nuevo caso añadido en la Base de Casos con la ID36: [Description: [RESMAS , No centrar los axis entre si , AXIS , 36 , EW]][Solution: [MO: Mantenimiento por Operador

...

336.0 , Centrar todos los axis entre si sobre eje de máquina , 36 , 23 , ENGRASAR Y RECALIBRAR TODOS LOS AXIS, ver instrucciones de fabricante , Se producen atascos.

Aceptar

Figura 5.31. Ventana de revisión de datos para el nuevo caso elegido, mediante preguntas de contexto operativo. 2ª etapa, RCM conductivo para aplicar la política de mantenimiento

Finalmente, la actividad de retención se comprueba verificando la persistencia, es decir, que el nuevo caso se encuentra almacenado la base de datos, en este caso en el fichero RCM_EW.csv, y que se encuentra agregado un nuevo caso con los identificadores de descripción y solución IDP=36 e IDS=36, respectivamente, tal y como se evidencia en la Tabla 5.5. Por motivos de espacio, la tabla se muestra dividida en dos partes, (a) y (b), entre su séptima columna (atributo F) y su octava columna (atributo FM). El nuevo caso agregado, se muestra igualmente resaltado en la Tabla 5.5, donde se puede comprobar

cómo se ha agregado el número de caso 36 dentro del atributo identificador de caso, como número consecutivo al último caso existente en la base de casos original. Obsérvese que el último caso en la base de casos original se corresponde con el caso número 35, IDP=IDS=35, según Tabla 5.3. Del mismo modo, se comprueba en la Tabla 5.5 que todos los atributos registrados del caso 36 contienen todos los valores obtenidos en el proceso de solución del nuevo caso planteado, conforme lo conducido por las Figura 5.28 a la Figura 5.31.

Tabla 5.5. Base de casos en fichero RCM_EW.csv con el nuevo caso ID=36 registrado.

#IDP	S	I	E	FF	IDS	F	FM	FE	NPR	PT	MC	II	R
1	EW	RESMAS	AXIS	Ajustarse al formato fuera d	1	Ajustarse al ancho del forma	Holgura existente entre H	Afecta a la pre	72	Sistema de engrase	REDISEÑO	X	TM
2	EW	RESMAS	AXIS	No centrar los axis entre sí	2	Centrar todos los axis entre :	Desajuste entre axis 3, 5 y	Se producen a	72	Calibrar AXIS según	MTO BASADO EN TIEMPO	365	TM/PROD
3	EW	RESMAS	AXIS	No centrar algún axis sobre	3	Centrar todos los axis entre :	Desajuste en mismo axis (Se producen a	72	Engrase tuercas AX	MTO BASADO EN TIEMPO	30	MP
4	EW	RESMAS	PLEGADORES	No pliega	4	Plegado laterales del paquet	Se producen pérdidas mei	Rompe el paq	360	Ajustar pistón y reg	RESTAURACIÓN	X	TE
5	EW	RESMAS	PLEGADORES	No pliega	5	Plegado laterales del paquet	Mala regulación de las re:	Desencadena	360	Restaurar palas en	RESTAURACIÓN	X	TM
6	EW	RESMAS	PLEGADORES	No pliega	6	Plegado laterales del paquet	Mal ajuste y desencadena	Desencadena	360	Restaurar tornillerí	RESTAURACIÓN	X	TM
7	EW	RESMAS	COLA	No dosificar la cola por ning	7	Dosificación de cola para el	Se reproduce cuando se g	Colapso del si	168	Cargar al inicio de t	MTO BASADO EN TIEMPO	1 vez c	PROD
8	EW	RESMAS	COLA	No dosificar la cola por ning	8	Dosificación de cola para el	En la BOMBA DE COLA se	Colapso del si	168	MECANISMO: Ajust	REDISEÑO	X	TM
9	EW	RESMAS	COLA	No dosificar la cola por ning	9	Dosificación de cola para el	En la BOMBA DE COLA se	Colapso del si	168	Sistema de recogid	MTO BASADO EN TIEMPO	1 vez p	PROD
10	EW	RESMAS	COLA	No dosificar la cola por algu	10	Dosificación de cola para el	Se atoran las TOBERAS pc	Colapso del si	168	Inspección de valor	MTO BASADO EN CONDICIÓN	7	MP
11	EW	RESMAS	COLA	No dosificar la cola por algu	11	Dosificación de cola para el	Se atoran las TOBERAS pc	Colapso del si	168	Procedimiento de l	MTO BASADO EN TIEMPO	1	PROD
12	EW	RESMAS	COLA	No dosificar la cola por algu	12	Dosificación de cola para el	Se seccionan los cables in	Colapso del si	168	Procedimiento de l	MTO BASADO EN TIEMPO	7	PROD
13	EW	RESMAS	COLA	No dosificar la cola por algu	13	Dosificación de cola para el	En el MECANISMO del mc	Se derrama cc	168	Procedimiento de r	MTO BASADO EN TIEMPO	182	TE
14	EW	DESBOBINAD	CORTAORILLOS	No cortar	14	Realizar el corte del ancho d	Se desgasta la cuchilla hasi	Mal corte y re	280	Modificar cuchilla y	REDISEÑO	X	TM
15	EW	DESBOBINAD	CORTAORILLOS	No corta con precisión	15	Realizar el corte del ancho d	Desgaste fuera de los lími	Mal corte y re	280	A) Sustitución por c	MTO BASADO EN TIEMPO	30	TM
16	EW	DESBOBINAD	CORTAORILLOS	No corta con precisión	16	Realizar el corte del ancho d	Se desgasta la contracuch	Mal corte y re	280	A) Sustitución por c	MTO BASADO EN TIEMPO	30	TM
17	EW	DESBOBINAD	CORTAORILLOS	No corta con precisión	17	Realizar el corte del ancho d	Al producirse el desgaste	Aceleración d	280	A) Sustitución por c	MTO BASADO EN TIEMPO	30	TM
18	EW	E/S PALETIZA	PALETIZADOR	En la carga el palet vira al pa	18	Carga y posicionamiento aut	La cinta intermedia no es	Tropezía el pa	280	Eliminar holgura en	RESTAURACIÓN	X	TM
19	EW	E/S PALETIZA	PALETIZADOR	No posiciona correctamente	19	Carga y posicionamiento aut	El mecanismo de ajuste d	No posiciona	280	A) Restaurar el sist	REDISEÑO	X	TM
20	EW	E/S PALETIZA	PALETIZADOR	No posiciona correctamente	20	Carga y posicionamiento aut	El mecanismo de ajuste d	No posiciona	280	Engrase cadenas de	MTO BASADO EN TIEMPO	90	TM
21	EW	E/S PALETIZA	PALETIZADOR	No transferir el palet cargad	21	Transferir palets cargados m	El palet cargado tropieza	Se produce ca	640	A) Bajar nivel cinta	REDISEÑO	X	TM
22	EW	E/S PALETIZA	PALETIZADOR	No transferir el palet cargad	22	Transferir palets cargados m	Se produce un retardo de	Provoca el at	640	Ajuste de nivel y po	MTO BASADO EN TIEMPO	30	TM
23	EW	RESMAS	PISONES	No adecuación de la presiór	23	Los pisones deben ajustarse	El fallo se reproduce al ex	Se produce ur	35	Calibración AXIS 1	MTO BASADO EN TIEMPO	365	TM
24	EW	RESMAS	PISONES	No adecuación de la presiór	24	Los pisones deben ajustarse	El fallo se reproduce al ex	Se produce ur	35	Inspección de valor	MTO BASADO EN CONDICIÓN	7	MP
25	EW	RESMAS	FRENOS	No realiza la frenada en el ti	25	Realizar la frenada del moto	El fallo se reproduce en e	Esto provoca	640	Inspeccionar el est	MTO BASADO EN CONDICIÓN	30	TM
26	EW	RESMAS	LIMITADOR DE PAR	No realiza la frenada en el ti	26	Realizar una adaptación dura	El fallo se reproduce en e	Esto provoca	640	A) Inspeccionar el e	MTO BASADO EN CONDICIÓN	30	TE
27	EW	RESMAS	BARRAS DESPLEGAD	No ajustar la longitud de des	27	Predesenrollar la envoltura	El mecanismo de fallo típi	Los paquetes	75	Restaurar cadenas	RESTAURACIÓN	X	TM
28	EW	RESMAS	BARRAS DESPLEGAD	No ajustar la longitud de des	28	Predesenrollar la envoltura	El mecanismo de fallo típi	Los paquetes	75	A) Nivelar barras de	MTO BASADO EN TIEMPO	90	TM
29	EW	RESMAS	BARRAS DESPLEGAD	No centrar el embalaje desp	29	Predesenrollar la envoltura	El mecanismo de fallo se	Se descentra c	250	Reemplazar correa	RESTAURACIÓN	X	TM
30	EW	RESMAS	BARRAS DESPLEGAD	No centrar el embalaje desp	30	Predesenrollar la envoltura	El mecanismo de fallo se	Se descentra c	250	Inspección del esta	MTO BASADO EN CONDICIÓN	7	MP
31	EW	RESMAS	CUADRO B.T.	El sistema de alarma por Fal	31	Protección MagnetoTérmica	El sistema de proteccion	Para la máqui	560	Ajustar la sensibili	RESTAURACIÓN	X	TE
32	EW	RESMAS	CUADRO B.T.	El sistema de alarma por sal	32	Protección MagnetoTérmica	Se produce un salto de la	Para la rullier	560	Ajustar la sensibili	RESTAURACIÓN	X	TE
33	EW	DESBOBINAD	CARGA BOBINAS	Asistencia parcial en maneje	33	Asistir en la carga de bobinas	La desnivelación de la plu	Esfuerzos inn	12	A) Nivelación de la	RESTAURACIÓN	X	TM
34	EW	DESPALETIZA	PROTECCIÓN	Subida descontrolada	34	Subida de plataforma elevad	El fallo se reproduce cuar	Rotura de la p	216	Mejorar soporte de	RESTAURACIÓN	X	TE
35	EW	DESPALETIZA	PROTECCIÓN	Subida descontrolada	35	Subida de plataforma elevad	El fallo se reproduce cuar	Rotura de la p	216	Inspección: A) Com	MTO BASADO EN TIEMPO	7	MP
36	EW	RESMAS	AXIS	No centrar los axis entre sí	36	Centrar todos los axis entre :	Desajuste entre axis 3, 5 y	Se producen a	504.0	RECALIBRAR	MO: Mantenimiento por Opera	23	TM

5.4.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS EN EL ÁMBITO OPERATIVO

Se ha desarrollado un modelo de mantenimiento centrado en fiabilidad RCM conductivo, de tal forma que asista al usuario responsable del diseño personalizado de planes de mantenimiento de una planta industrial, posibilitando al efecto tres grandes ventajas: la primera el ahorro considerable de tiempo que supone realizar un Análisis de Modos de Fallos, Efectos y Criticidades (FMECA), la segunda la minimización del error humano en cuanto al tratamiento de una serie extensa de casos históricos; y la tercera ventaja, supone que la aplicación AIRCM creada al efecto sea usada como formación para el usuario inexperto de mantenimiento, donde puede ser totalmente guiado en el proceso, accediendo a todos los casos históricos almacenados y resueltos con éxito, de este modo se dispone una aplicación AIRCM que puede ser usada como sistema de entrenamiento mediante simulación de casos, proporcionando una componente didáctica.

Una vez validada la aplicación AIRCM, mediante el ingreso de distintos casos de entrada y obteniendo la solución correspondiente. Las ventajas y bondades del modelo de mantenimiento centrado en fiabilidad RCM conductivo propuesto ha sido probado exitosamente planteando una serie de nuevos casos en la para la sección EW donde se dispone de una base de casos de éxito de programas de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM) ya implementados. Los nuevos casos han posibilitado la simulación en el entorno de la aplicación AIRCM, obteniendo los siguientes resultados, Tabla 5.6, ante entradas consideradas en el cuadro siguiente. Se muestra con X la totalidad de casos simulados para cada todas las variables de entrada {INSTALACIÓN, EQUIPO y FALLO FUNCIONAL}.

Tabla 5.6. Simulaciones realizadas para validación de la aplicación AIRCM

SIMULACIÓN	INSTALACIÓN	EQUIPO	FALLO FUNCIONAL	% ACIERTO
1	X			100
2		X		100
3			X	100
4	X	X		100
5		X	X	100
6	X		X	100
7	X	X	X	100

Cabe señalar que se ha verificado la robustez del modelo RCM conductivo propuesto, dejando algunos valores correspondientes a las variables de entrada vacíos, como se evidencia en la tabla anterior para las simulaciones de 1 a 3, donde sólo se ha informado una variable de entrada, para las simulaciones de 4 a 6, informando dos variables de entrada, siendo el campo 7 informado todas las variables de entrada. Para todas las simulaciones realizadas se ha observado que se muestran correctamente como resultados los casos recuperados más similares al problema planteado, incluso con falta de información de entrada. Concluyendo por tanto el proceso de validación. Del mismo modo, se ha comprobado la bondad del sistema, introduciendo algunos casos de entrada, como consulta al problema, informando en la consulta solamente el campo de entrada FALLO FUNCIONAL (FF), de forma aproximada a como se haría un caso real y dejando el resto de los campos; EQUIPO, INSTALACIÓN y SECCIÓN vacíos, sin información de entrada, es decir, se trata de describir el problema planteado de un caso existente, mediante una descripción parecida para observar la respuesta del sistema. La Tabla 5.7 evidencia este tipo de simulaciones para mostrar los resultados, como casos recuperados similares, concluyéndose que existe una buena respuesta del sistema.

Tabla 5.7. Simulaciones de casos planteados y casos similares recuperados

PROBLEMAS PLANTEADOS	CONSULTA (DESCRIPCIÓN FF)	PRIMER CASO RECUPERADO (DESCRIPCIÓN FF)	IDs
1	El embalaje se dobla	No centrar el embalaje desplegado sobre las bandas	29,30,2
2	Dispara magneto-termico	El sistema de alarma por Fallo Magnetotérmico	31,14,15
3	El palé se gira	No transferir el palé cargado	21,22,19
4	No ajusta longitud de papel por barras desplegadas	No centrar el embalaje desplegado sobre las bandas	29,30,27

El uso de la aplicación desarrollada en un proceso de diseño de mantenimiento en una planta industrial en operación ha permitido observar las siguientes mejoras en los resultados:

Se ha conseguido una destacable reducción de tiempo dedicado para aplicar la metodología de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM). Considerando que un caso como el planteado en este trabajo requiere de una serie de reuniones del grupo RCM creado ex profeso, además de un análisis documental de las especificaciones de los activos objeto de mantenimiento y su contexto operacional, el desarrollo del proceso de Análisis de Modos de Fallo, Efectos y Criticidades (FMECA), y la aplicación correcta del flujograma de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM), se obtiene una reducción de cuatro horas dedicadas en el proceso RCM clásico por parte el responsable del diseño de mantenimiento, a 30 minutos que se han empleado en usar el proceso RCM conductivo mediante la aplicación AIRCM desarrollada y usada en este trabajo. Todo ello sin considerar los tiempos que han debido emplearse por los integrantes del grupo RCM en las distintas reuniones organizadas.

Otra ventaja conseguida con la ejecución de la aplicación AIRCM ha sido la gestión del conocimiento adquirido en cuanto a la resolución de problemas ocurridos en la planta. Partiendo del hecho de ejecutar con éxito una vasta cantidad de veces la aplicación del programa de mantenimiento centrado en fiabilidad RCM conductivo, se obtendrá una gran cantidad de casos históricos eficazmente resueltos, por lo que supone una gran cantidad de información, la cual será considerada como capital intelectual almacenado. Cuando se dispone de una gran cantidad de casos en una base de datos, se hace difícil y arduo manipular la misma mediante consulta directa por parte de un responsable de mantenimiento. Este fenómeno se mitiga con los procesos de recuperación de casos similares implementados en la propia aplicación, por lo que se gestiona con mucha precisión la recuperación de casos y este problema queda resuelto.

Se hace especial énfasis en el uso de la aplicación desarrollada como gestor de conocimiento en el más amplio término, pues al albergar una gran base de casos de éxito conseguidos para resolver problemas reales de la planta, posibilita el hecho de ser usada como un simulador para entrenar a usuarios noveles o inexpertos en procesos de diseño de planes de mantenimiento.

5.5. CONSIDERACIONES FINALES

En este capítulo se muestran los resultados de la aplicación de la estructura metodológica descrita en el capítulo anterior, poniendo de manifiesto, a partir de los objetivos marcados por la dirección empresarial, resultados para cada módulo que sirven como entrada para el módulo siguiente, y obteniendo una serie de resultados para cada definición, hasta conseguir el objetivo final marcado: un programa de mantenimiento particularizado para el centro productivo en función de los problemas de fiabilidad y seguridad que ocurren en el mismo.

Los resultados de esta Tesis Doctoral muestran que la metodología presentada permite, a grandes rasgos, que se conduzca el proceso de establecer las acciones necesarias de mantenimiento personalizado a la realidad productiva del centro conforme a la alineación de la terna de objetivos definidos, a la par que se reduce el tiempo y error humano asociado empleando metodologías estándar.

CAPÍTULO 6:

CONCLUSIONES

6.1. Introducción al capítulo _____	123
6.2. Conclusiones del sistema asistido para la definición estratégica _____	124
6.3. Conclusiones del sistema asistido para la definición táctica _____	126
6.4. Conclusiones del sistema asistido para la definición operativa _____	128
6.5. Conclusiones finales y desarrollos futuros _____	131

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

6.1. INTRODUCCIÓN AL CAPÍTULO

En el presente capítulo se concluyen los resultados obtenidos en la Tesis Doctoral sobre el sistema asistido global siguiendo el diseño modular según las definiciones establecidas; estratégica, táctica y operativa, conforme al esquema general mostrado en la Figura 3.1.

En primer lugar, se ha empleado el presente estado del arte, como punto de partida de investigación para desarrollar la Tesis Doctoral de un sistema asistido para la decisión estratégica y planificación de los procesos de mantenimiento en plantas industriales. Se parte, como metodologías más próximas, la integración de dos existentes de contrastado éxito industrial, por un lado, la metodología RCM (Reliability Centered Maintenance) conforme al rendimiento operativo de mantenimiento, por otro la metodología BSC (Balanced ScoreCard) conforme a la alineación de objetivos de mantenimiento con los estratégicos de la empresa. Se pretende emplear técnicas basadas en conocimiento KBS (Knowledge Based Systems) para dotar al sistema de asistencia a las decisiones de mantenimiento, de modo óptimo y cada vez más rápido, conforme a esquemas de mejora continua. De igual modo se consideran técnicas de Proceso Analítico Jerárquico (AHP) usadas en Cuadro de Mando Integral (BSC), y aunque se han usado para la selección de estrategias de mantenimiento conforme los trabajos de Bevilacqua y Braglia [Bevilacqua y Braglia, 2000] y Bertoni y Bevilacqua [Bertolini y Bevilacqua, 2006], presenta la ventaja de un método multi-criterio y siendo más empleado en etapas de diseño de programas de mantenimiento inicial, la principal desventaja es no tener el mismo grado de éxito contrastado en el ámbito industrial como RCM. No obstante, existe la posibilidad de dotar al método de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM) de un enfoque probabilístico según el trabajo de Eisinger

y Rakowsky [Eisinger y Rakowsky, 2001] para considerar incertidumbres, pasando de una selección basada en respuestas (SI/NO) a grados de credibilidad, y revela los posibles problemas de diseño y sus causas. Por otro lado, Van Horenbeek [Van Horenbeek et al., 2011] plantea que los modelos actuales de optimización de mantenimiento no consideran criterios clave de negocio.

En segundo lugar, se han sintetizado los beneficios y posibilidades de uso potencial de los sistemas asistidos a la decisión estratégica de mantenimiento, considerando como bases el rendimiento operativo de mantenimiento y la alineación con los objetivos de una fábrica industrial para suponer un impacto positivo en los beneficios de la misma. Dicho impacto se evidencia con los estudio empíricos de: Kumar [Kumar et al., 2006], estableciendo un vínculo entre estrategias de negocio y estrategias de mantenimiento, Swanson [Swanson, 2001] relacionando las estrategias de mantenimiento y el rendimiento de la planta productiva, Marais y Saleh [Marais y Saleh, 2009] presentando un enfoque financiero de mantenimiento, no basado en costes, como una función que eleva el valor presente de un sistema, su estrategia debe ser optimizada dinámicamente conforme los cambios operacionales y de mercado, y Alsyouf [Alsyouf, 2007] elimina la creencia de mantenimiento como centro de costes, probando que es una función de generación de beneficios, evidenciando la influencia que presentan las eficaces políticas de mantenimiento en la productividad del proceso y beneficio de empresas de mejora continua (perfil frecuente en plantas industriales de producción continua).

En los siguientes apartados se expondrán las conclusiones de la presente Tesis Doctoral divididas en tres apartados, conforme a los tres enfoques establecidos: estratégico, táctico y operativo.

6.2. CONCLUSIONES DEL SISTEMA ASISTIDO PARA LA DEFINICIÓN ESTRATÉGICA

La misión de esta definición estratégica ha consistido en describir el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) usando el enfoque de Cuadro de Mando Integral (BSC)

aplicado a una planta industrial, como primer módulo que considera el concepto personalizado de mantenimiento, atendiendo a un enfoque puramente estratégico del negocio industrial, cuyo resultado servirá de entrada al segundo módulo con alcance táctico. Esta visión modular permite seguir un esquema top-down o “divide y vencerás” partiendo en las primeras etapas, más estratégicas, un alto nivel de abstracción.

Conforme se avanza en las sucesivas etapas modulares aumenta la profundidad de conocimiento en aquellas áreas o elementos seleccionados, centrándose cada vez más en mayor detalle, hasta alcanzar en las últimas etapas modulares, los detalles de averías, fallos operativos y/o patologías particulares presentes en los distintos elementos de los equipos, instalaciones y máquinas del proceso productivo de la planta. Si bien, a priori en la gestión diaria de estos problemas pueden presentarse camuflados al ser considerados operativamente no relevantes, de patología aparentemente “inofensiva” o de poca importancia operativa, y puede traducirse, por su frecuencia de aparición o sus consecuencias en un alto impacto en el negocio industrial. En definitiva, se trata de llevar la estrategia a operación, pasando por el nivel táctico, definiendo una alineación clara y concisa de objetivos a todos los niveles de una organización productiva.

La aplicación del primer módulo, de nivel estratégico, en una planta industrial, se ha destacado su uso como herramienta para decidir por parte de un grupo de expertos formados por responsables estratégicos de distintos ámbitos, del conjunto de áreas productivas de la planta industrial, qué área será la elegida a aplicar las acciones de mantenimiento, de tal modo que se aumente su eficacia productiva. Como área productiva se ha entendido una sección o unidad productiva claramente separada por la planta industrial. Para ello se ha modelado el problema decisional empleando la técnica del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) con el enfoque de Cuadro de Mando Integral (BSC), siendo las alternativas, en este caso, 4 áreas productivas que fueron preseleccionadas por los expertos. El esquema de cálculo Proceso Analítico Jerárquico-Cuadro de Mando Integral (AHP-BSC) ha sido presentado mostrando sus variables: criterios-perspectivas y subcriterios-Indicadores de Rendimientos Clave (KPI). Se ha

usado el paquete comercial Expert Choice para modelar el problema y analizar los resultados. Como resultado, de una decisión conjunta, se ha elegido un área productiva y se ha analizado la sensibilidad de la decisión, asegurando que la misma es robusta. De este modo la definición estratégica del sistema asistido, conforme el modelo AHP-BSC, presenta las siguientes conclusiones:

1. Usado como primera etapa de asistencia a la primera decisión de nivel estratégico, permite evaluar la consistencia individual y re-considerar las ponderaciones hasta conseguir un nivel especificado de consistencia individual.
2. Como modelo multi-agente, la combinación de juicios individuales, dota el esquema de mayor robustez además de incorporar el conocimiento de los expertos al modelo, registrando sus preferencias individuales y combinando las mismas.
3. Al ser un modelo multi-criterio, presenta una ventaja respecto a la versatilidad en el tratamiento de la información; los datos del proceso industrial pueden ser incorporados como variables cuantitativas, cualitativas, o bien una mezcla de ambas. Esta flexibilidad permite que el modelo AHP-BSC pueda ser usado en aquellas plantas industriales con información pobre, sea por desconocimiento de ciertos datos o por ser de acceso restringido.
4. Como última conclusión se evalúa la sensibilidad del modelo, permitiendo observar la susceptibilidad ante incertidumbres en los datos y la robustez de la decisión grupal, permitiendo reformular los juicios de los expertos en aquellas perspectivas o variables que se evidenciaron poco robustas.

6.3. CONCLUSIONES DEL SISTEMA ASISTIDO PARA LA DEFINICIÓN TÁCTICA

Se ha desarrollado un modelo de análisis de componentes principales y aprendizaje automático, Análisis de Componentes Principales- Aprendizaje Automático (PCA-ML),

para que pueda ser integrado en cuadros de mando con enfoque tradicional (BSC), incluyendo así una definición táctica sobre enfoques estratégicos a más largo plazo como son un Cuadro de Mando Integral (BSC) clásicos. Esta nueva extensión ha permitido controlar mejor la función mantenimiento de una planta industrial, a medio plazo, con horizonte temporal mensual, de tal forma que permita medir unos indicadores de aquellas áreas productivas de consideradas previamente como estratégicas. Este modelo de algoritmo de Análisis de Componentes Principales (PCA) y de Aprendizaje Automático (ML), usando redes neuronales artificiales, se ha podido integrar muy fácilmente en cualquier cuadro de mando tradicional, convirtiendo el código fuente desarrollado a paquetes de distintos lenguajes de programación (C, C++, Java, .NET, Python) incluso como una librería para ser usada como una función en una hoja de cálculo o una aplicación ejecutable independiente. Además, se ha dotado, al cuadro de mando, de aprendizaje automático con la finalidad de descubrir estructuras y patrones de comportamiento, relativamente ocultas, en las órdenes de trabajo. Mediante agrupamiento o técnica clustering, se ha determinado grupos naturales sobre las variables coste y mano de obra de mantenimiento, además de realizar predicciones sobre la disponibilidad del área productiva objeto, mediante los indicadores Eficiencia Global de Equipo (OEE) y Tiempo Medio Hasta el Fallo MTTF.

Se ha conseguido integrar nuevas funcionalidades en el modelo de cuadro de mando sobre una fábrica de producción de papel: Por un lado, posibilitar una fase exploratoria de datos de mantenimiento que permite analizar aquellos valores de mantenimiento que más influyen las órdenes de trabajo. Por otro lado, dotar al cuadro de mando de un modelo de predicción de la disponibilidad de máquinas en función de valores característicos de producción. Tras validar el modelo, se concluye que puede predecir con buena precisión los valores de fiabilidad y mantenibilidad de alta y baja amplitud de oscilación en el tiempo, en máquinas de producción de fábricas de papel, tanto de forma individual por máquina, M1 y M2, como analizadas de forma conjunta, M1+M2.

6.4. CONCLUSIONES DEL SISTEMA ASISTIDO PARA LA DEFINICIÓN OPERATIVA

Si bien, existe recientemente una preocupación por expertos de planta en ampliar las aptitudes de la metodología de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM) en aras de mejorarlo, según el trabajo de Melani [Melani et al., 2018], estas mejoras suponen la sustitución del método RCM por un modelo secuencial de metodologías de Análisis Funcional de Operabilidad, Hazard and Operability Study (HAZOP), Análisis de Modos de Fallo, Efectos y Criticidades, Failure Mode, Effect and Criticality Analysis (FMECA) y Proceso Analítico en Red, Analytic Network Process (ANP), lo que supone un enorme esfuerzo en preparar toda la documentación y estudios para llevar a cabo esta filosofía, redundando en un aumento del esfuerzo y del tiempo dedicado respecto a la aplicación de un proceso RCM clásico, por lo que éste último se identifica como un método más pragmático, de fácil aplicación y personalización conforme establece Piechnicki [Piechnicki et al., 2017], conforme a las hipótesis de partida de este trabajo e integrando convenientemente la metodología de Razonamiento Basado en Casos (CBR) acentúa más la reducción de tiempo dedicado por los expertos en mantenimiento de la planta, conforme la finalidad que persigue el modelo planteado en esta Tesis Doctoral.

Por otro lado, las ventajas que supone el uso de la metodología de Razonamiento Basado en Casos (CBR) como la explotación de casos históricos ocurridos y resueltos exitosamente, supone aumentar las aptitudes resolutivas humanas de pensamiento abstracto con apoyo y recuperación de casos similares a un problema nuevo planteado, máxime cuando existen una gran cantidad de casos, donde la memoria humana tiene ciertas limitaciones para manejar una base de gran cantidad de casos ocurridas en épocas distintas y muy dispersas en el tiempo. La metodología de Razonamiento Basado en Casos (CBR) ha sido usada exitosamente en plantas industriales de fabricación, donde se ha contrastado la bondad de la misma como una técnica de gestión del conocimiento, permitiendo vencer las actuales barreras de compartir conocimiento en centros industriales, posibilitando gestionar el conocimiento captando y reusando el mismo durante los procesos de mejora continua, esto se consigue integrando la

metodología de Razonamiento Basado en Casos (CBR) con los repositorios existentes de productos, procesos y recursos en la gestión del ciclo de vida durante la resolución de problemas diarios de una planta, conforme establece Camarillo [Camarillo et al., 2017].

Existe un problema adicional y que se suele presentar cuando se inicia un proyecto donde se aplica la metodología de Razonamiento Basado en Casos (CBR), ocasionado por la aún escasa cantidad de datos que se obtienen de una base de casos inicial. Investigaciones recientes como Ji [Ji et al., 2018] han advertido que existe poca investigación respecto a esta carencia y han incorporado métodos de minería de datos para suplir esta falta de datos, es decir, se expande el conocimiento existente dentro de un rango, para rellenar esta falta de datos. Esto supone una mejora sustancial cuando las bases de casos contienen muy pocos datos, lo que mermaría el potencial de la metodología de Razonamiento Basado en Casos (CBR). Del mismo modo también se han incorporado métodos de minería de datos para mejorar la eficacia y precisión en cuanto al proceso de retención de conocimiento de la metodología de razonamiento basado en casos establecido por Guo [Guo et al., 2011].

La integración de ambas metodologías, Mantenimiento Centrado en Fiabilidad y Razonamiento Basado en Casos (RCM-CBR), con éxito para el ámbito de la mejora en la gestión óptima del mantenimiento de activos de una planta industrial es el fin que se persigue en esta Tesis Doctoral. Si bien se han mostrado las bondades individuales de ambos métodos para la mejora de la eficacia de procesos industriales, la unión de ambas apuntando a la dirección única de diseñar planes de mantenimiento produce un efecto combinado en cuanto a su eficacia, precisión y minimización del tiempo dedicado para conseguirlo. Se ha conseguido como ventaja adicional reorientar el tiempo dedicado a la personalización del plan de mantenimiento, ya que al ahorrar tiempo de empleo de metodología de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM) al utilizar un proceso conductivo y de recuperación automática de soluciones al problema planteado, permite que el usuario encargado de diseño del plan de mantenimiento invierta su tiempo en personalizar, mediante adaptación de casos recuperados, la nueva

solución propuesta, además de realizar un correcto seguimiento de la ejecución de la solución planteada.

Como conclusión de este módulo, dentro del proceso global de asistencia a la decisión y planificación de procesos de mantenimiento, se ha desarrollado y empleado una aplicación independiente en lenguaje de programación Java con el objeto de conducir el proceso completo de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM) con el uso de algoritmos de Razonamiento Basado en Casos (CBR) para recuperar y explorar casos de fallos similares desde una base de casos históricos sucedidos y cuyas soluciones fueron aplicadas con éxito en plantas industriales equivalentes, lo que ha supuesto una explotación del conocimiento histórico de problemas y sus soluciones ocurridas en plantas industriales, esto ha permitido además extender y aunar el capital intelectual humano inherente en todas las industrias como son los expertos de diversas áreas; mandos intermedios de mantenimiento, de producción, ingenieros de procesos y de mantenimiento, además del personal de talleres; mecánicos, electricistas, electrónicos, etc. Esta filosofía de integración de ambos paradigmas (RCM-CBR) ha permitido agrupar los distintos agentes anteriormente descritos que están involucrados en los problemas de fiabilidad de la planta industrial para reducir el tiempo dedicado que requeriría aplicar un proceso de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM) clásico. Esta ventaja de ahorro de tiempos ha supuesto una ventaja competitiva en cuanto la implementación de las acciones correctoras entran a formar parte del programa de gestión de mantenimiento, consiguiendo que los efectos de su aplicación se obtengan antes respecto a la aplicación clásica de la metodología RCM, canalizando el esfuerzo de análisis en las siguientes áreas críticas objeto de mejora. Se ha conseguido finalmente que esta última parte sea mucho más rápida, operativa y sus objetivos se alineen con los dos objetivos precedentes, táctico y estratégico, respectivamente, cuyo efecto conjunto ha dimanado en aumentar la eficacia global de la empresa industrial.

Como conclusión final de la presente Tesis Doctoral, se ha presentado un sistema modular para asistencia a la toma de decisiones y diseño de planes de mantenimiento, donde cada módulo presenta distintos enfoques y alcances bajo la filosofía top-down o divide y vencerás⁵, de tal modo que partiendo desde una problemática y perspectiva general se ha conseguido actuar sobre un cierto número limitado de equipos, agrupados y seleccionados mediante el análisis del sistema, interviniendo sólo en aquellos fallos que ocasionan por su riesgo y/o criticidad pérdidas, tanto desde el punto de vista económico por no pérdida de productividad consecuencia de paradas inesperadas, como técnico por no conseguir la fiabilidad requerida, o de inseguridad por el peligro hacia el medio ambiente o las personas que operan la planta industrial. En resumen, existen tres tipos de enfoques coincidiendo con los tres módulos definidos de tal modo que posibiliten alinear los objetivos estratégicos de dirección con los tácticos de mandos intermedios y operativos de técnicos y operadores de la planta industrial.

6.5. CONCLUSIONES FINALES Y DESARROLLOS FUTUROS

Como conclusión final de esta Tesis Doctoral, se ha presentado un sistema asistido para la decisión estratégica y planificación de procesos de mantenimiento industrial, en el que cabe sintetizar los siguientes aspectos clave:

1. Se ha diseñado para que los objetivos a largo plazo o estratégicos se alineen con los objetivos operativos de corto plazo, involucrando los objetivos tácticos de medio plazo, de tal forma que el sistema en su ejecución intrínseca posibilite tal alineación de objetivos, difíciles de alinear, ya que corresponden con centros decisores distintos; directivos, mandos intermedios y operadores de la planta.

⁵ Divide et impera del latín “dividi e domina” es un movimiento de procedencia no conocida con seguridad cuyo significado quiere decir división, rivalidad, discordia aplicado sobre el pueblo por parte de los que desean dominarlo.

2. Se ha establecido un diseño modular, basado en estos tres objetivos, definidos como M1 estratégico, M2 táctico y M3 operativo, que permita la posibilidad de desacoplar internamente sus métodos y filosofías, y la conexión entre cada uno de ellos se realice en la modalidad caja negra, es decir, el flujo de información de salida del módulo M1 será la entrada del módulo M2 y la salida de éste será la entrada del módulo M3. Esta arquitectura modular y secuencial, ha permitido como ventaja principal, la modificación interna de metodología y/o tecnología empleada en un módulo sin perturbar los otros restantes, otra ventaja obtenida del sistema modular es que permite la incorporación de más módulos, como por ejemplo un posible cuarto módulo M4 que podría ser de simulación del proceso mediante la incorporación de un gemelo digital de la planta e incluso también se podría eliminar un módulo para simplificar la toma de decisiones en plantas que por sus peculiaridades no necesiten establecer una toma de decisiones de las aquí consideradas, por ejemplo, se podría eliminar el módulo M1, prescindiendo de la decisión estratégica implementando el sistema directamente una máquina concreta desde el módulo táctico M2 y posterior M3.

3. Se han aunado metodologías de éxito ampliamente reconocido en ámbito industrial para cada módulo y se ha validado su utilidad mediante su implementación en una planta de producción de papel. Concretamente se han integrado las metodologías de Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y Cuadro de Mando Integral (BSC) para la definición estratégica, Análisis de Componentes Principales (PCA) y Aprendizaje Automático (ML) para la definición táctica y finalmente Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM) y Razonamiento Basado en Casos (CBR) para la definición operativa.

4. Por último, se ha desarrollado una aplicación específica, denominada AIRCM en lenguaje de programación Java usando librerías especializadas de Razonamiento Basado en Casos (CBR), mediante librerías construcción de sistemas CBR

jCOLIBRI. Esta aplicación permite realizar el proceso de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM) de forma conductiva asistido por razonamiento basado en casos históricos anteriores.

Los posibles desarrollos futuros son amplios, en base al sistema modular descrito, aunque se sugieren los siguientes:

1. Desarrollar un cuarto módulo, secuencia del anterior módulo M3, donde se posibilite validar las soluciones propuestas mediante simulación de la planta digitalizada en un entorno computacional y alimentada por datos en tiempo real de la misma, es decir, validar el resultado probándolo con un gemelo digital de la planta industrial.
2. Se plantea, para los equipos productivos determinados como clave como resultado de aplicar el sistema asistido, una extensión de funcionalidad, disponiendo una interfaz del sistema a modo de realidad aumentada que capacite a los mandos intermedios de la planta observar las incidencias y variables productivas de la misma en tiempo real. Esto a su vez contribuye a hacer la fábrica mucho más visual y eficaz en la gestión operativa de la misma.
3. Del mismo modo, se sugiere integrar un módulo de gestión de los distintos programas de mantenimiento predictivo, que como resultado del módulo M3 se hayan implantado. De tal modo que el sistema asistido permita gestionar eficazmente las distintas tecnologías predictivas en los diversos equipos heterogéneos que componen una planta, a modo de ejemplo, este programa debería solucionar en su gestión, la correcta estipulación de niveles de alarmas y un criterio clave para decidir cuándo bajar de nivel y observar variables tecnológicas, solo en aquellas situación de alarma que lo requieran, lo que

permite un ahorro eficaz del tiempo dedicado de los técnicos especialistas de mantenimiento predictivo.

CAPÍTULO 7:

REFERENCIAS

CAPÍTULO 7: REFERENCIAS

- [Abdi y Williams, 2010] Abdi H., Williams L. J., “Principal component analysis”, *Computational Statistics*, 2(4), 433–459, 2010.
- [Alpaydin, 2004] Alpaydin E., “Introduction to Machine Learning”, MIT Press, Cambridge, MA, EE.UU., 2004.
- [Anderson y Neri, 1990] Anderson R.T., Neri L., “Reliability Centered Maintenance: Management and Engineering Methods”, Elsevier Applied Science, Londres, Reino Unido, 1990.
- [Alsayouf, 2007] Alsayouf I., “The role of maintenance in improving companies’ productivity and profitability”, *International Journal of Production Economics*, 105(1), 70-78, 2007.
- [Antucheviciene et al., 2015] Antucheviciene J., Kala Z., Marzouk M., and Vaidogas E. R., “Decision making methods and applications in civil engineering,” *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, article 160569, 3 pages, 2015.
- [Astigarraga, 2003] Astigarraga E., “El Método Delphi”, San Sebastián: Facultad de Economía y Administración de Empresas, Universidad de Deusto, 2003.
- [Bashiri et al., 2011] Bashiri M., Badri H., and Hejazi T. H., “Selecting optimum maintenance strategy by fuzzy interactive linear assignment method”, *Applied Mathematical Modelling*, 35(1), 152–164, 2011.
- [Bevilacqua y Braglia, 2000] Bevilacqua M., Braglia M., “The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection”, *Reliability Engineering and System Safety*, 70(1), 71-83, 2000.
- [Bertolini y Bevilacqua, 2006] Bertolini M., Bevilacqua M., “A combined goal programming-AHP approach to maintenance selection problem”, *Reliability Engineering and System Safety*, 91(7), 839-848, 2006.
- [Bose y Mahapatra, 2001] Bose I. and Mahapatra R. K., “Business data mining -A machine learning perspective”, *Information and Management*, 39(3), 211–225, 2001.
- [Calvo et al., 2007] Calvo R., Domingo R., Sebastián M.A., “Operational flexibility quantification in a make-to-order assembly system”, *International Journal of Flexible Manufacturing System*, 19(3), 247-263, 2007.
- [Calvo et al., 2008] Calvo R., Domingo R., Sebastián M. A., “Systemic criterion of sustainability in agile manufacturing”, *International Journal of Production Research*, 46(12), 3345–3358, 2008.
- [Calvo y Domingo, 2013] Calvo L. M., Domingo R., “A first approach to the use of CO₂ emissions as a maintenance indicator in industrial plants”, *The Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2013, Procedia Engineering*, 63, 678–686, 2013.
- [Calvo y Domingo, 2015] Calvo L. M., Domingo R., “Influence of process operating parameters on CO₂ emissions in continuous industrial plants”, *Journal of Cleaner Production*, 96, 253–262, 2015.

- [Calvo y Domingo, 2017] Calvo L. M., Domingo R., “CO₂ emissions reduction and energy efficiency improvements in paper making drying process control by sensors,” *Sustainability*, 9(4), article 514, 2017.
- [Camarillo et al., 2017] Camarillo A., Ríos J., Althoff K. D., “CBR and PLM applied to diagnosis technical support during problem solving in the continuous improvement process of manufacturing plants”, *Procedia Manufacturing*, 13, 987-994, 2017.
- [Candea et al., 2014] Candea G., Kifor S., Constantinescu C. “Usage of case-based reasoning in FMEA-driven software”, *Procedia CIRP*, 25, 93-99, 2014.
- [Celen y Djurdjanovic, 2020] Celen M., Djurdjanovic D., “Integrated maintenance and operations decision making with imperfect degradation state observations”, *Journal of Manufacturing Systems*, 55, 302-316, 2020.
- [Chebel-Morello et al., 2012] Chebel-Morello B., Medjaher K., Hadj Arab A., Bandou F., Bouchaib S., Zerhouni N. “E-maintenance for photovoltaic power generation system”, *Energy Procedia*, 18, 640-642, 2012.
- [Cheng et al., 2008] Cheng Z., Jia X., Gao P., Wu S. Wang J., “A framework for intelligent reliability centered maintenance analysis”, *Reliability Engineering and System Safety*, 93(6), 806-814, 2008.
- [Cheng et al., 2015] Cheng M.-Y., Wibowo D. K., Prayogo D., Roy A. F. V., “Predicting productivity loss caused by change orders using the evolutionary fuzzy support vector machine inference model”, *Journal of Civil Engineering and Management*, 21, 881–892, 2015.
- [Chieh-Yuan y Chuang-Cheng, 2009] Chieh-Yuan T., Chuang-Cheng C., “Developing a significant nearest neighbour search method for effective case retrieval in a CBR system”, *International Association of Computer Science and Information Technology - Spring Conference*, 262-266, 2009.
- [Cho y Lee, 2011] Cho C., Lee S., “A study on process evaluation and selection model for business process management”, *Expert Systems with Applications*, 38(5), 6339-6350, 2011.
- [Dalkey y Helmer, 1963] Dalkey N., Helmer O., “An experimental application of the Delphi Method to the use of experts”, *Management Science*, 9(3), 458-467, 1963.
- [Denisov et al., 2013] Denisov M.V., Kamaev V.A., Kizim A.V. “Organization of the repair and maintenance in road sector with ontologies and multi-agent systems”, *Procedia Technology*, 9, 819-825, 2013.
- [Díaz-Agudo et al., 2007] Díaz-Agudo B., González-Calero P. A., Recio-García J. A., Sánchez-Ruiz-Granados A. A., “Building CBR Systems with jCOLIBRI”, *Science of Computer Programming*, 69(1-3), 68-75, 2007.
- [Diez-Olivan et al., 2019] Diez-Olivan A., Del Ser J., Galar D., Sierra B., “Data fusion and machine learning for industrial prognosis: trends and perspectives towards industry 4.0”, *Information Fusion*, 50, 92-111, 2019.
- [Domingo y Aguado, 2015] Domingo R., Aguado S., “Overall environmental equipment effectiveness as a metric of a lean and green manufacturing system”, *Sustainability*, 7(7), 9031–9047, 2015.
- [Eclipse, 2019] Eclipse Foundation, <https://www.eclipse.org/>, [consultado en noviembre 2019].

- [Eisinger y Rakowsky, 2001] Eisinger S., Rakowsky U.K., “Modeling of uncertainties in reliability centered maintenance-a probabilistic approach”, *Reliability Engineering and System Safety*, 71(2), 159-164, 2001.
- [Erozan, 2019] Erozan I. “A fuzzy decision support system for managing maintenance activities of critical components in manufacturing systems”, *Journal of Manufacturing Systems* 52, 110–120, 2019.
- [Expert Choice Inc., 2015] www.expertchoice.com, Expert Choice software, Expert Choice for Collaborative Decision Making, Richmond, [consultado en enero 2015].
- [Faccio et al., 2014] Faccio M., Persona A., Sgarbossa F., Zanin G., “Industrial maintenance policy development: A quantitative framework”, *International Journal of Production Economics* 147, 85-93, 2014.
- [Feng et al., 2018] Feng H., Xi L., Xiao L., Xia T., Pan E., “Imperfect preventive maintenance optimization for flexible flowshop manufacturing cells considering sequence-dependent group scheduling”, *Reliability Engineering and System Safety* 176, 218-229, 2018.
- [Fouladgar et al., 2012] Fouladgar M. M., Lashgari A., Turskis Z., Yazdani-Chamzini A., and Zavadskas E. K., “Maintenance strategy selection using AHP and COPRAS under fuzzy environment”, *International Journal of Strategic Property Management*, 16(1), 85– 104, 2012.
- [Gabbar et al., 2003] Gabbar H. A., Yamashita H., Suzuki K., Shimada Y., “Computer-aided RCM-based plant maintenance management system”, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 19(5), 449-458, 2003.
- [Galankashi et al., 2016] Galankashi M. R., Helmi S. A., Hashemzahi P., “Supplier selection in automobile industry: a mixed balanced scorecard-fuzzy AHP approach”, *Alexandria Engineering Journal*, 55, 93-100, 2016.
- [Guo et al., 2011] Guo Y., Hu J., Peng Y., “Research on CBR System based on data mining”, *Applied Soft Computing*, 11(8), 5006-50014, 2011.
- [Guo-Niu, 2015] Guo-Niu Z., Jie H., Jin Q., Jin M., Ying-Hong P., “An integrated feature selection and cluster analysis techniques for case-based reasoning”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 39, 14-22, 2015.
- [Heinrich, 2020] Heinrich M., Meunier S., Samé A., Quéval L., Darga A., Oukhellou L., Multon B., “Detection of cleaning interventions on photovoltaic modules with machine learning”, *Applied Energy*, 263, article 114642, 12 pages, 2020.
- [Hernández et al., 2004] Hernández Orallo J., Ramírez Quintana M. J., Ferri Ramírez C., “Introducción a la minería de datos”, Pearson Prentice Hall, Madrid, España, 2004.
- [Huang, 2009] Huang H-C., “Designing a knowledge-based system for strategic planning: A balanced scorecard perspective”, *Expert Systems with Applications*, 36(1), 209-218, 2009.
- [Huang et al., 2011] Huang H.C., Lai M.C., Lin L.H., “Developing strategic measurement and improvement for the biopharmaceutical firm: using the BSC hierarchy”, *Expert Systems with Applications*, 38(5), 4875-4881, 2011.
- [Ilangkumaran y Kumanan, 2009] Ilangkumaran M., Kumanan S., “Selection of maintenance policy for textile industry using hybrid multi-criteria decision making approach”, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 20(7), 1009–1022, 2009.

- [Ji et al., 2018] Ji S., Ann J., Lee E., Kim Y., “Learning method for knowledge retention in CBR cost models”, *Automation in Construction*, 96, 65-74, 2018.
- [Jiang et al., 2016] Jiang H., Zou Y., Zhang S., Tang J., Wang Y., “Short- Term Speed Prediction Using Remote Microwave Sensor Data: Machine Learning versus Statistical Model”, *Mathematical Problems in Engineering*, article 9236156, 13 pages, 2016.
- [Kayri, 2016] Kayri M., “Predictive abilities of Bayesian regularization and Levenberg-Marquardt algorithms in artificial neural networks: a comparative empirical study on social data”, *Mathematical & Computational Applications*, 21(20), 11 pages, 2016.
- [Kim et al., 2013] Kim M., Jang Y.C., Lee S., “Application of Delphi-AHP methods to select the priorities of WEEE for recycling in a waste management decision-making tool”, *Journal of Environmental Management*, 128(15), 941-948, 2013.
- [Kobbacy, 2012] Kobbacy K., “Application of artificial intelligence in maintenance modelling and management”, *IFAC Proceedings Volumes*, 45(31), 54-59, 2012.
- [Köksal et al., 2011] Köksal G., Batmaz I., Testik M. C., “A review of data mining applications for quality improvement in manufacturing industry,” *Expert Systems with Applications*, 38(10), 13448–13467, 2011.
- [Kumar et al., 2006] Kumar S., Pintelon S., Verrecke A., “An empirical investigation on the relationship between business and maintenance strategies”, *International Journal of Production Economics*, 104(1), 214-229, 2006.
- [Lazarova-Molnar y Mohamed, 2019] Lazarova-Molnar S., Mohamed N., “Reliability assessment in the context of industry 4.0: data as a game changer”, *Procedia Computer Science*, 151, 691-698, 2019.
- [Lee et al., 2008] Lee A., Chen W. C., Chang C. J., “A fuzzy AHP and BSC approach for evaluating performance of IT department in the manufacturing industry in Taiwan”, *Expert Systems with Applications*, 34(1), 96-107, 2008.
- [Lee y Shin, 2019] Lee I., Shin Y. J., “Machine learning for enterprises: Applications, algorithm selection, and challenges”, *Business Horizons*, 63(2), 157-170, 2020.
- [Li et al., 2014] Li H., Parikh D., He Q., Qian B., Li Z., Fang D., Hampapur A., “Improving rail network velocity: A machine learning approach to predictive maintenance”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 45, 17–26, 2014.
- [Li et al., 2019] Li X., Nassehi A., Epureanu B.I., “Degradation-aware decision making in reconfigurable manufacturing systems”, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 68(1), 431-434, 2019.
- [Lu y Xu, 2019] Lu Y., Xu X., “Cloud-based manufacturing equipment and big data analytics to enable on-demand manufacturing services”, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 57, 92-102, 2019.
- [Madic et al., 2016] Madic M., Antucheviciene J., Radovanovic M., Petkovic D., “Determination of manufacturing process conditions by using MCDM methods: Application in laser cutting”, *Engineering Economics*, 27, 144–150, 2016.
- [Mahdiloo et al., 2012] Mahdiloo M., Saen R. F., Tavana M., “A novel data envelopment analysis model for solving supplier selection problems with undesirable outputs and lack of inputs”, *International Journal of Logistics Systems and Management*, 11(3), 285–305, 2012.

- [Marais y Saleh, 2009] Marais K.B., Saleh J.H., “Beyond its cost, the value of maintenance: An analytical framework for capturing its net present value”, *Reliability Engineering and System Safety*, 94(2), 644-657, 2009.
- [Mardani et al., 2015] Mardani A., Jusoh A., Zavadskas E. K., “Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications—two decades review from 1994 to 2014”, *Expert Systems with Applications*, 42, 4126–4148, 2015.
- [Martínez-Martínez et al., 2015] Martínez-Martínez V., Gomez-Gil F., Ma L., Gomez-Gil J., Ruiz-Gonzalez R., “An Artificial Neural Network based expert system fitted with genetic algorithms for detecting the status of several rotary components in agro-industrial machines using a single vibration signal”, *Expert Systems with Applications*, 42, 6433-6441, 2015.
- [Matlab, 2019] Mathworks, *Introducing Machine Learning*, <https://www.mathworks.com>, [consultado en noviembre 2019].
- [Melani et al., 2018] Melani A. H. A., Murad C. A., Netto A. C., de Souza G. F. M., Nabeta S.I., “Criticality-based maintenance of a coal-fired power plant”, *Energy*, 147, 767-781, 2018.
- [Modak et al., 2019] Modak M., Ghosh K. K., Pathak K., “A BSC-ANP approach to organizational outsourcing decision support-A case study”, *Journal of Business Research*, 103, 432-447, 2019.
- [Moret et al., 2020] Moret S., Babonneau F., Bierlaire M., Maréchal F., “Decision support for strategic energy planning: A robust optimization framework”, *European Journal of Operational Research*, 280, 539-554, 2020.
- [Moubray, 1997] Moubray J., “Reliability-centered Maintenance”, Segunda Edición, Industrial Press, Nueva York, EE.UU., 1997.
- [Naganathan et al., 2016] Naganathan H., Chong W. O., Chen X., “Building energy modeling (BEM) using clustering algorithms and semi-supervised machine learning approaches,” *Automation in Construction*, 72, 187–194, 2016.
- [Nilashi et al., 2016] Nilashi M., Esfahani M. Z., Ramayah T., Ibrahim O., Esfahani M. D., Roudbaraki M. Z., “A multicriteria collaborative filtering recommender system using clustering and regression techniques,” *Journal of Soft Computing and Decision Support System*, 3, 24–30, 2016.
- [Nowlan y Heap, 1978] Nowlan F. S., Heap H. F., “Reliability Centered Maintenance”, United Airlines Publications, San Francisco, EE.UU., 1978.
- [Olivencia et al., 2015] Olivencia Polo F., Ferrero Bermejo J., Gómez Fernández J., Crespo Márquez A., “Failure mode prediction and energy forecasting of PV plants to assist dynamic maintenance tasks by ANN based models”, *Renewable Energy*, 81, 227-238, 2015.
- [Oluwasegun y Jung, 2020] Oluwasegun A., Jung J-C., “The application of machine learning for the Prognostics and Health Management of control element drive system”, *Nuclear Engineering and Technology*, Available online 15 May 2020, 2020.
- [Oracle, 2019] Java, <https://www.oracle.com/es/java/>, [consultado en noviembre 2019].
- [Palocsay et al., 2010] Palocsay S.W., Markham I.S., Markham S.E., “Utilizing and teaching data tools in Excel for exploratory analysis”, *Journal of Business Research*, 63(2), 191-206, 2010.

- [Pei, 2013] Pei Z., “Simplification of fuzzy multiple attribute decision making in production line evaluation”, *Knowledge-Based Systems* 47, 23-34, 2013.
- [Piechnicki et al., 2017] Piechnicki F., Loures E., Santos E., “A conceptual framework of knowledge conciliation to decision making support in RCM deployment”, *Procedia Manufacturing*, 11, 1135-1144, 2017.
- [Plaza et al., 2019] Plaza M., Zebala W., Matras A., “Decision system supporting optimization of machining strategy”, *Computer & Industrial Engineering*, 127, 21-38, 2019.
- [Pujadas y Chen, 1996] Pujadas W., Chen F.F., “A Reliability centered maintenance strategy for a discrete part manufacturing facility”, *Computers and Industrial Engineering*, 31(1-2), 241-244, 1996.
- [Quiñones-Sinisterra y Cavalcante, 2020] Quiñones-Sinisterra W., Cavalcante C.A.V., “An integrated model of production scheduling and inspection planning for resumable jobs”, *International Journal of Production Economics* 227, 107668 (14 páginas), 2020.
- [Recio-García et al., 2008] Recio-García J. A., Díaz-Agudo B., González-Calero P. A., “jCOLIBRI 2 case-based reasoning framework”. Document version 1.2. Group for Artificial Intelligence Applications, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 2008.
- [Recio-García, 2008] Recio-García J. A., Tesis doctoral “jCOLIBRI: Una plataforma multi-nivel para la construcción y generación de sistemas de Razonamiento Basado en Casos”. Departamento de Ingeniería del Software e Inteligencia Artificial, Facultad de Informática, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 2008.
- [Riesbeck y Schank, 1989] Riesbeck C. K., Schank R. C., “Inside case-based reasoning”, Erlbaum, Northvale, New Jersey, 1989.
- [Rodríguez-Padial et al., 2015] Rodríguez-Padial N., Marín M., Domingo R., “Strategic framework to maintenance decision support systems”, *Procedia Engineering* 132, 903-910, 2015.
- [Rodríguez-Padial et al., 2017a] Rodríguez-Padial N., Marín M., Domingo R., “An approach to integrating tactical decision-making in industrial maintenance balance scorecards using principal components analysis and machine learning”, *Complexity*, 2017(2), 1-15, 2017.
- [Rodríguez-Padial et al., 2017b] Rodríguez-Padial N., Marín M., Domingo R., “An approach to evaluate tactical decision-making in industrial maintenance”, *Procedia Manufacturing* 13, 1051-1058, 2017
- [Rohani et al., 2011] Rohani A., Abbaspour-Fard M. H., Abdolahpour S., “Prediction of tractor repair and maintenance costs using Artificial Neural Network,” *Expert Systems with Applications*, 38(7), 8999–9007, 2011.
- [Rosqvist et al., 2009] Rosqvist T., Laakso K., Reunanen M., “Value-driven maintenance planning for a production plant”, *Reliability Engineering and System Safety*, 94(1), 97-110, 2009.
- [Rumelhart et al., 1986] Rumelhart D. E., Hinton G. E., Williams R. J., “Learning representations by back-propagating errors”, *Nature*, 323, 533–536, 1986.
- [Salton y McGill, 1983] Salton G., McGill M.J., “Introduction to Modern Information Retrieval”. McGraw-Hill, Nueva York, EE.UU., 1983.
- [Saaty, 2012] Saaty, T.L. “Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World”. Tercera edición, RWS Publications, Pittsburgh, EE.UU., 2012.

- [Sardana et al., 2016] Sardana D., Terziovski M., Gupta N., “The impact of strategic alignment and responsiveness to market on manufacturing firm's performance”, *International Journal of Production Economics*, 177, 131-138, 2016.
- [Shan et al., 2019] Shan W., Dongbo L., Gao J., Jing L., “A knowledge based machine tool maintenance planning system using case-based reasoning techniques”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 58, 80-96, 2019.
- [Schank, 1977] Schank R. C., Abelson R. P., “Scripts, plans, goals and understanding: an inquiry into human knowledge structures”, Erlbaum, Hillsdale, New Jersey, EE.UU., 1977.
- [Schank, 1982] Schank R.C., “Dynamic memory: a theory of reminding and learning in computers and people”, Cambridge University Press, Nueva York, EE.UU., 1982.
- [Slack y Brandon-Jones, 2019] Slack N., Brandon-Jones, A., “Operations management”, Novena Edición, Pearson, Harlow, Reino Unido, 2019.
- [Smith, 1993] Smith A. M., “Reliability Centered Maintenance”, McGraw-Hill, Nueva York, EE.UU., 1993.
- [Swanson, 2001] Swanson L., “Linking maintenance strategies to performance”, *International Journal of Production Economics*, 70(3), 237-244, 2001.
- [Tobon-Mejia et al., 2012] Tobon-Mejia D. A., Medjaher K., Zerhouni N., “CNC machine toolswear diagnostic and prognostic by using dynamic Bayesian networks”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 28, 167–182, 2012.
- [Theriou et al., 2004] Theriou N., Demitriades E., Chatzoglou P., “A proposed framework for integrating the balanced scorecard into the strategic management process”, *Operational Research. An International Journal*, 4, 147-165, 2004.
- [Trappey et al., 2015] Trappey A., Trappey C., Ma L., Chang J., “Intelligent engineering asset management system for power transformer maintenance decision supports under various operating conditions”, *Computer & Industrial Engineering*, 84, 3-11, 2015.
- [UNE-EN 13306, 2018] UNE-EN 13306 “Mantenimiento. Terminología del mantenimiento”, AENOR, 38 páginas, 2018.
- [UNE-EN 15341, 2008] UNE-EN 15341 “Mantenimiento. Indicadores clave de rendimiento del mantenimiento”, AENOR, 30 páginas, 2008.
- [UNE-EN 60300-3-1, 2005], UNE-EN 60300-3-1 “Gestión de la confiabilidad. Parte 3-1: Guía de aplicación. Técnicas de análisis de confiabilidad. Guía metodológica (IEC 60300-3-1:2003)”, AENOR, 69 páginas, 2005.
- [UNE-EN 60300-3-11, 2013], UNE-EN 60300-3-11 “Gestión de la confiabilidad. Parte 3-11: Guía de aplicación. Mantenimiento centrado en la fiabilidad (IEC 60300-3-11:2009)”, AENOR, 50 páginas, 2013.
- [Valipour et al., 2016] Valipour A., Yahaya N., Md Noor N., Mardani A., Antucheviciene J., “A new hybrid fuzzy cybernetic analytic network process model to identify shared risks in PPP projects”, *International Journal of Strategic Property Management*, 20, 409–426, 2016.
- [Van Horenbeek et al., 2011] Van Horenbeek A., Pintelon, L., Muchiri P. “Maintenance optimization models and criteria”, *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*, 1(3), 189-200, 2011.

- [Vellido et al., 2012] Vellido A., Martín-Guerrero J. D., Lisboa P. J. G., “Making machine learning models interpretable”, en Proceedings of the 20th European Symposium on Artificial Neural Networks, Computational Intelligence and Machine Learning, ESANN 2012, 163–172, 2012.
- [Waeyenbergh y Pintelon, 2002] Waeyenbergh G., Pintelon L., “A framework for maintenance concept development”, International Journal of Production Economics, 77(3), 299-313, 2002.
- [Watson, 1997] Watson I., “Applying case-based reasoning: techniques for enterprise systems”, Morgan Kaufmann, CA, EE.UU., 1997.
- [Watson, 1999] Watson I., “Case-based reasoning is a methodology not a technology”, Knowledge-Based Systems, 12(5-6), 303–308, 1999.
- [Wang et al., 2007] Wang L., Chu J., Wu J., “Selection of optimum maintenance strategies based on a fuzzy analytic hierarchy process”, International Journal of Production Economics, 107(1), 151–163, 2007.
- [Wang et al., 2020] Wang L., Long F., Liao W., Liu H., “Prediction of anaerobic digestion performance and identification of critical operational parameters using machine learning algorithms”, Bioresource Technology, 298, 122495, 2020.
- [Wollmann y Steiner, 2017] Wollmann D., Steiner M. T., “The strategic decision-making as a complex adaptive system: a conceptual scientific model,” Complexity, 2017, article 7954289, 13 pages, 2017.
- [Wu et al., 2009] Wu H.Y., Tzeng G.H., Chen Y.-H., “A fuzzy MCDM approach for evaluating banking performance based on Balanced Scorecard”, Expert Systems with Applications, 36(6), 10135-10147, 2009.
- [Yu et al., 2015] Yu J.-H., Jeon M.-Y., Kim T. W., “Fuzzy-based composite indicator development methodology for evaluating overall project performance”, Journal of Civil Engineering and Management, 21, 343–355, 2015.
- [Yüksel y Dagdeviren, 2010] Yüksel I., Dagdeviren M., “Using the fuzzy analytic network process (ANP) for Balanced Scorecard (BSC): A case study for a manufacturing firm”, Expert Systems with Applications, 37(2), 1270-1278, 2010.
- [Zaho y You, 2019] Zaho L., You F., “A data-driven approach for industrial utility systems optimization under uncertainty”, Energy, 182, 559–569, 2019.
- [Zavadskas et al., 2016] Zavadskas E. K., Bausys R., Stanujkic D., Magdalinovic-Kalinovic M., “Selection of lead-zinc flotation circuit design by applying WASPAS method with single-valued neutrosophic set”, Acta Montanistica Slovaca, 21, 85–92, 2016.

CURRICULUM VITAE

Formación

Ingeniero Industrial. (ETSII Universidad de Málaga, 2004).

Diploma de Estudios Avanzados programa Doctorado en Ingeniería de Construcción y Producción (U.N.E.D.)

Experiencia Profesional

DIRECCIÓN, PRINCIPIA ENGINEERING AND INNOVATIONS, S.L.U (2015-actualidad)

Consultoría orientada a impulsar PYMEs, implementando modelos de industria 4.0.

DIRECCIÓN OPERACIONES Y DESARROLLO DE NEGOCIO, ENELUZ 2025, S.L. (2014-2015)

Fundador y Desarrollo técnico de empresa comercializadora de energía eléctrica.

DIRECCIÓN TÉCNICA, APOSTELS HISPANO, S.L. (2011-2014)

Desarrollo proyectos de industria agroalimentaria en invernaderos productivos.

SUPERVISOR DE PLANTA, SECICAR, S.A. (2009-2010)

Ingeniería de mantenimiento en almacenamiento de hidrocarburos.

INGENIERO DE PROYECTOS, FLUELEC EIGRA, S.A. (2009)

Responsable de Dpto. de ingeniería en instalaciones eléctricas, mecánicas, fotovoltaica.

DIRECTOR TÉCNICO, GREENSOL LAS LAERILLAS, S.L. (2007-2009)

Proyectos e instalaciones de energía solar térmica y fotovoltaica.

INGENIERO DE MANTENIMIENTO, TORRASPAPEL, S.A. (CENTRO MOTRIL) (2005-2007)

Desarrollo del programa de mantenimiento predictivo y líder en implantación de la metodología RCM colaborando con Tobalina Consulting Group. Planificación de trabajos, programación y gestión de talleres.

STAGE, FIAT AUTO, S.P.A (STABILIMENTO FIAT CASSINO, ITALIA) (2004)

Despegue formativo en instalaciones productivas de Fiat Auto S.p.A. (Stabilimento FIAT Cassino Italia) en la unidad de ensamblado de la carrocería del vehículo.

COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS INDUSTRIALES ANDALUCÍA ORIENTAL (2018-actual)

Delegado-Adjunto de la delegación de Granada y miembro de Junta de Gobierno.

Experiencia Docente

PROFESOR TUTOR, CENTRO ASOCIADO UNED DE MOTRIL (Curso 2011/2012-actualidad)

Titulado EESS. Profesor-Tutor asignaturas Grados Ingenierías ETSII: Fundamentos de Ciencia de Materiales I, Ciencia e Ingeniería de Materiales, Fundamentos de

Informática, Álgebra, Cálculo, Ecuaciones Diferenciales, y Fundamentos Matemáticos aplicados a las Ciencias Sociales (Grado Turismo).

Publicaciones

Rodríguez-Padial N., Marín M., Domingo R., “Strategic framework to maintenance decision support systems”, *Procedia Engineering* 132, 903-910, 2015.

Rodríguez-Padial N., Marín M., Domingo R., “An approach to integrating tactical decision-making in industrial maintenance balance scorecards using principal components analysis and machine learning”, *Complexity*, 2017(2), 1-15, 2017.

Rodríguez-Padial N., Marín M., Domingo R., “An approach to evaluate tactical decision-making in industrial maintenance”, *Procedia Manufacturing* 13, 1051-1058, 2017

Ponencias en congresos

Rodríguez-Padial N., Marín M., Domingo R., “Strategic framework to maintenance decision support systems”, 6th Manufacturing Engineering Society International Conference (MESIC), 22-24 de julio de 2015, Barcelona [ver publicaciones]

Rodríguez-Padial N., Marín M.M., Domingo R., “An approach to evaluate tactical decision-making in industrial maintenance”, 7th Manufacturing Engineering Society International Conference (MESIC 2017), 28-30 de junio 2017, Vigo [ver publicaciones]