

**Selección de proyectos
considerando variables de entorno.
Aplicación al mantenimiento de
instalaciones eléctricas.**

Autor: Oscar García Fernández

Tesis doctoral



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

2015

**Selección de proyectos
considerando variables de entorno.
Aplicación al mantenimiento de
instalaciones eléctricas.**

Autor: Oscar García Fernández

Tesis doctoral/2015

Director: Ángel S. Fernández Castro

Métodos y Técnicas de Investigación en la Gestión de Organizaciones
DEPARTAMENTO DE ECONOMÍA FINANCIERA Y CONTABILIDAD

*”Cuando creíamos que teníamos todas las respuestas,
de pronto, cambiaron todas las preguntas.”*

Mario Benedetti.

Para María

Resumen

En esta Tesis se profundiza en el problema de selección de proyectos considerando variables de entorno a partir del estudio de la programación de tareas de mantenimiento en sistemas eléctricos. Se aplican principios de control de procesos dinámicos en sistemas físicos y mediante técnicas de investigación cualitativas se modela sistema y entorno en ontologías de dominio sobre las que se replican las preferencias del decisor.

Se diseña un modelo de tres etapas: La primera etapa será la aceptación o no de un proyecto en función de la relevancia que tenga para el sistema. Sobre las aceptadas, en la segunda etapa se seleccionarán un subconjunto de alternativas que maximice el rendimiento mediante un modelo adaptativo de búsqueda secuencial. En la tercera etapa, se realiza la distribución de los medios disponibles mediante una técnica de asignación secuencial de recursos,

Finalmente, se desarrolla una aplicación práctica de este modelo como herramienta de ayuda a la decisión multicriterio y multiobjetivo en la programación de tareas de mantenimiento en sistemas eléctricos.

Resumo

Nesta tese profúndase no problema de selección de proxectos considerando variables de contorna a partir do estudo da programación de tarefas de mantemento en sistemas eléctricos. Aplícanse principios de control de procesos dinámicos en sistemas físicos e mediante técnicas de investigación cualitativas modelase sistema e contorna en ontoloxías de dominio sobre as que se replican as preferencias do decisor.

Deséñase un modelo de tres etapas: A primeira etapa será a aceptación ou non dun proxecto en función da relevancia que teña para o sistema. Sobre as aceptadas, na segunda etapa seleccionaranse un subconxunto de alternativas que maximice o rendemento mediante un modelo adaptativo de procura secuencial. Na terceira etapa, realízase a distribución dos medios dispoñibles mediante unha técnica de asignación secuencial de recursos.

Desenvólvese unha aplicación práctica deste modelo como ferramenta de axuda á decisión multicriterio e multiobxectivo na programación de tarefas de mantemento en sistemas eléctricos.

Abstract

This thesis explores the portfolio problem considering context variables from the study of scheduling maintenance on electrical systems. Principles of control of dynamic processes in physical systems are applied. The system and its environment are modeled by domain ontologies on which the preferences of the decision maker are replicated.

A three stage model is designed: The first stage will be the acceptance or rejection of a project based on its importance for the system. In the second stage a subset of alternatives from the accepted set is selected to maximize performance through a sequential search adaptive model. In the third stage, the distribution of available resources is done using a technique of sequential resource allocation.

A system of decision support, multicriteria and multiobjective, for tasks scheduling maintenance on electrical systems is developed as practical application of the model.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer especialmente a mi Director de Tesis, Ángel Fernández Castro, haberme brindado la oportunidad de realizar esta tesis doctoral. Agradezco su continuo apoyo y dedicación, así como el esfuerzo que ha empleado para que este proyecto se llevase a cabo.

Aprovecho aquí para recordar anónimamente a todos aquellos que, acompañándome durante mis etapas académicas y laborales, han contribuido con aportaciones teóricas y prácticas en la elaboración de esta Tesis.

Por supuesto, agradezco a mi familia y en especial a mis hijos María, Gonzalo y Álvaro, que han sabido entender mi dedicación a este proyecto.

Y sobre todo, a María. *"No voy a rebuscar en la academia, palabras para ver quién me las premia, si este mundo cabe en dos palabras:"* . . . ¡Muchas gracias!

Índice general

Lista de figuras	III
Lista de tablas	V
Lista de Acrónimos	VII
1. Introducción.	1
1.1. Presentación	1
1.2. Planteamiento del problema.	3
1.2.1. Enunciado del Problema	4
1.3. Estrategía de investigación y contribuciones.	6
1.4. Organización del documento.	7
2. Teoría del Problema.	10
2.1. Descripción general del entorno.	10
2.2. Decisiones de mantenimiento de instalaciones.	20
2.3. Definición de Sistemas y sus procesos.	23
2.4. Necesidad del modelado de sistemas.	24
2.5. Aceptación o no del proyecto considerado individualmente.	27
2.6. El problema de selección de un único proyecto de entre un conjunto de alternativas excluyentes.	28
2.6.1. Problema de asignación secuencial de tareas.	29
2.6.2. Problema de rutas de vehículos.	31
2.6.3. Problema de rutas de vehículos con viaje de regreso, múltiples viajes y ventanas de tiempo.	33
2.7. El problema de selección de un subconjunto de alternativas dentro de un conjunto de proyectos aceptables.	35
3. Descripción de las alternativas	37
3.1. Introducción	37
3.2. El mantenimiento como selección de proyectos.	39
3.3. Modelado de sistemas.	40

3.3.1.	Las relaciones causales.	41
3.3.2.	Representación de sistemas mediante redes.	44
3.3.3.	Caracterización de las variables.	45
3.3.4.	Modelado matemático de sistemas.	47
3.4.	Métodos de identificación de variables.	49
3.4.1.	Investigación Racionalista.	49
3.4.2.	Método del caso.	49
3.4.3.	Selección del método.	51
3.5.	Representación del conocimiento de las variables.	52
3.5.1.	Modelado del conocimiento.	53
3.5.2.	Razonamiento sobre ontologías.	55
3.5.3.	Aplicación de razonamiento basado en casos.	57
3.6.	Influencia de las variables.	59
3.6.1.	Las variables en el control de procesos.	60
3.6.2.	Factores y variables clave de un sistema	74
4.	Desarrollo del Modelo de Decisión.	76
4.1.	Introducción	76
4.2.	Descripción de un caso práctico de toma de decisión.	78
4.3.	Representación del conocimiento del caso práctico.	82
4.3.1.	Conceptos modelables del caso práctico.	82
4.3.2.	Representación de los conceptos.	86
4.4.	Selección de tareas e incorporación en programación: Herramienta de Ayuda a la decisión.	94
4.4.1.	Aceptación o no del proyecto considerado individualmente.	94
4.4.2.	Selección de un subconjunto de alternativas dentro de un conjunto de proyectos aceptables.	118
4.4.3.	Selección de un único proyecto de entre un conjunto de alternativas excluyentes.	122
4.4.4.	Ámbito de aplicación del modelo	124
5.	Aplicación del Modelo.	128
5.1.	Implementación de la herramienta de ayuda a la decisión.	128
5.1.1.	Etapa de Aceptación.	128
5.1.2.	Etapa de Programación.	130
5.1.3.	Etapa de Asignación.	144
5.1.4.	Análisis comparativo: Modelo teórico frente a caso real.	154
6.	Conclusiones	158
6.1.	Cuestiones planteadas y resumen de la investigación.	158
6.2.	Contribuciones del estudio.	160
6.3.	Limitaciones y futuras líneas de investigación.	162

Índice de figuras

2.1. Mapa de la red de transporte de España. (Imagen tomado de [dE09])	15
2.2. Grafo Disyuntivo.	31
3.1. Fases del razonamiento basado en Casos (CBR)	54
3.2. Representación esquemática de un proceso.	60
3.3. Representación esquemática del control predictivo de un proceso.	62
3.4. Esquema de un sistema adaptativo simple.	64
3.5. Trayectorias deseadas de salida y acción de control en la entrada para cada instante de control.	66
3.6. Horizonte de predicción del modelo.	68
3.7. Modelo de referencia.	72
3.8. Trayectoria de referencia deseada.	73
3.9. Ajuste de la trayectoria deseada al cambiar las condiciones externas.	74
4.1. Componentes por niveles de tensión de una red de transporte y distribución eléctrica.	83
4.2. Fuentes de datos para el mantenimiento de instalaciones.	84
4.3. Representación de una línea eléctrica con n vanos y n+1 apoyos.	84
4.4. Recopilación de defectos reglamentarios. (Imagen tomada de BOE RD337/2014, de 9 de mayo).	85
4.5. Estructura de búsqueda de información dentro de datos heterogéneos.	87
4.6. Clases de la ontología de dominio para el estudio de casos de fallos en instalaciones eléctricas.	90
4.7. Clases de la ontología de las entidades que componen un sistema eléctrico .	91
4.8. Clases de la ontología de los trabajos sobre instalaciones de un sistema eléctrico	92
4.9. Representación de la arquitectura del modelo de datos de conocimiento. . .	93
4.10. Factores que influyen en el mantenimiento e indicadores clave de rendimien- to del mantenimiento. Imagen tomada de Norma UNE-EN 15341-2008	97
4.11. Modelo de caja negra para un sistema de múltiples entradas y salidas	118
4.12. Trayectoria deseada proyectada TDP_k	120
4.13. Representación esquemática de las rutas entre instalaciones.	123

5.1. Variables que configuran la cláusula de seguridad.	129
5.2. Variables que configuran la cláusula de condiciones reglamentarias.	129
5.3. Variables que configuran la cláusula de calidad.	129
5.4. Variables que configuran la cláusula de influencia del fallo en la sociedad.	129
5.5. Variables que configuran la cláusula de afección a los costes.	130
5.6. Variables que configuran la cláusula de disponibilidad de recursos.	130
5.7. Lógica binaria que permite obtener la fórmula normal conjuntiva a partir de las variables de entrada.	131
5.8. Vista de los trabajos utilizados para probar el modelo.	133
5.9. Curva de la trayectoria deseada para el presupuesto anual de los trabajos.	134
5.10. Trayectoria de salida del modelo teórico para la variable de salida.	134
5.11. Listado de trabajos seleccionados para el instante de muestreo $k=5$	135
5.12. Curvas de salida real y modelada superpuestas	136
5.13. Detalle de las adaptaciones del modelo a los cambios en la salida esperada.	140
5.14. Detalle de la adaptación del modelo para el instante de control $k = 15$	141
5.15. Trabajos seleccionados por el modelo para el periodo de programación $k =$ 15	142
5.16. Vista de las trayectoria TDP_k generadas para cada periodo de programación.	143
5.17. Posiciones geográficas de las instalaciones.	144
5.18. Trabajos seleccionados por el modelo para el periodo $k = 21$	147
5.19. Rutas definidas por el modelo para los trabajos del periodo $k = 21$	153
5.20. Curvas superpuestas: Ideal Planificación (TDP_100); Salida Modelo (Y(52)_100); Real periodo (Real2014).	155

Índice de cuadros

4.1. Factores de coste no relevantes.	100
4.2. Factores de tiempos no relevantes.	101
4.3. Factores de efectivos no relevantes.	102
4.4. Factores de Horas/Hombre no relevantes.	103
4.5. Factores de costes de personal no relevantes.	103
4.6. Factores de producción no relevantes.	103
4.7. Factores fijos no relevantes.	104
4.8. Factores de mantenimiento no relevantes.	104
4.9. Factor de Energía: no relevante.	104
4.10. Factor de implicación del personal no relevante.	104
4.11. Factor de coste de formación no relevante.	105
4.12. Factor de repuestos no relevante.	105
4.13. Indicadores económicos relevantes.	105
4.14. Indicadores organizacionales relevantes.	106
4.15. Indicadores técnicos relevantes.	107
4.16. Variables que afectan a la seguridad.	115
4.17. Variables que afectan al estado reglamentario de las instalaciones.	115
4.18. Variables que afectan a la percepción social de los fallos y trabajos.	116
4.19. Variables que afectan a la calidad del servicio.	116
4.20. Variables que afectan a los costes económicos de los fallos y trabajos asociados.	116
4.21. Variables que afectan a la capacidad de los recursos para atender un fallo o trabajo de reparación.	117
4.22. Cláusulas disyuntivas que influyen en la aceptación de trabajos.	117
4.23. Selección de indicadores de mantenimiento que representan las salidas del sistema en estudio.	120
5.1. Parámetros del modelo en el instante $k=4$	135
5.2. Parámetros del modelo en el instante $k=7$	139
5.3. Parámetros del modelo en el instante $k=14$	143

5.4. Comparativa de avance trimestral del presupuesto: Teórico, real y obtenido
del modelo propuesto 156

Índice de Acrónimos

- AI: Inteligencia Artificial. (Artificial Intelligence)
- CBR: Razonamiento Basado en el Caso. (case based reasoning)
- CNE: Comisión Nacional de Energía.
- CNF: Fórmula Normal Conjuntiva. (Conjunctive Normal Form)
- EN: Norma Europea. (European Standard)
- GIS: Sistema de Información Geográfica. (Geographic Information System)
- JSSP: Problema de Asignación Secuencial de Tareas. (Job Shop Scheduling problem)
- KPI: indicador clave de rendimiento. (Key Performance Indicator)
- NLP: Programación No Lineal. (NonLinear Programming)
- NP-Completo: Tiempo Polinomial No Determinista-Completo. (Non-deterministic Polynomial-time)
- NP-Hard: Tiempo Polinomial No Determinista-Difícil. (Non-deterministic Polynomial-time hard)
- RAE: Real Academia Española.
- RD: Real Decreto.
- REE: Red Eléctrica de España.
- SAT: Problema de Satisfacibilidad Booleana. (Boolean Satisfiability Problem)
- TDP: Trayectoria Deseada Proyectada.
- TSP: Problema del Agente Viajero. (Travelling Salesman Problem)
- UNE: Una Norma Española.
- UTM: Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator. (Universal Transverse Mercator)
- VRP: Problema de rutas de vehículos. (Vehicle Routing Problem)
- VRPB-MTTW: Problema de rutas de vehículos con retorno, viajes múltiples y ventanas de tiempo. (Vehicle Routing Problem with Backhauls, Multiple Trips, and Time Window)

Capítulo 1

Introducción.

1.1. Presentación

En la literatura económica abundan los estudios acerca de los objetivos de una organización. La Microeconomía defiende como objetivo fundamental la maximización del beneficio. En el planteamiento de Galbraith, por contra, el objetivo último de la empresa es la supervivencia, mientras que el resto de los objetivos son metas inmediatas para el logro de la citada supervivencia. La gestión empresarial se define como *“el proceso de utilizar racionalmente los recursos que la empresa se apropia o capta, en orden a cumplir los objetivos que se plantea.”* [Tié90].

Bajo este enfoque, la búsqueda del máximo beneficio pierde interés pues, en la práctica, resulta improbable que se opte por la alternativa óptima por ser la racionalidad limitada [Sim57].

Bajo la perspectiva de la utilización racional de los recursos subyace el problema de la selección de proyectos de inversión, entendida en un sentido amplio como todo desembolso financiero dedicado a *“la adquisición de mercancías materias primas, consumos, prestaciones de servicios al personal y a terceros, etc.”* [FCDT02].

En muchas situaciones comunes, las decisiones son tomadas por un decisor habituado a tratar con dichas circunstancias con resultados aceptables, ya que, normalmente, se trata de satisfacer pocos objetivos, seleccionando entre las alternativas disponibles, que no siempre son todas las posibles ni están apoyadas por información suficiente para justificar adecuadamente la acción seleccionada. En cambio, en las organizaciones, las decisiones implican objetivos múltiples, varios decisores y están sujetas a revisiones externas. En estos casos, la utilización de una metodología de toma de decisiones permite abordar problemas de estructura compleja, justificando y cohesionando las decisiones y minimizando la subjetividad. Durante los últimos 60 años los estudios han ido evolucionando desde una concepción monocriterio con preponderancia de los criterios económicos, hacia una

concepción más amplia que considera diversos puntos de vista y añade nuevos criterios a los económicos [Loa03]. En esta línea, la literatura científica, cada vez más, considera soluciones que satisfacen en un grado aceptable al decisor en lugar de intentar alcanzar una solución óptima que sea la mejor en todos los criterios simultáneamente, pero que podría no estar disponible a tiempo o, simplemente, no ser realizable. Del mismo modo, la presencia de varios proyectos concurrentes afecta a la evaluación que se hace sobre ellos de manera individual debido a diversos factores: sinergias, ahorros en costes, complementariedades, . . . Crecientes referencias contemplan la necesidad de introducir las interdependencias a la hora de seleccionar una cartera de proyectos ([Che04], [Nut00] y [MCMP05]). Y también se han estudiado profusamente las condiciones en las que se seleccionan los proyectos y el tipo y calidad de la información utilizada para ello.

A la vista de la complejidad del problema de la toma de decisión, han surgido numerosas herramientas cuyo objetivo principal es ayudar al decisor. Cada una de ellas está orientada a un tipo de problema asociado con una información disponible, de modo que resulta difícil encontrar una herramienta que sirva para todos los casos y contextos. Entre las trabas que se encuentran estas herramientas caben citar:

- Desconocimiento por parte del decisor o comodidad al utilizar un método menos adecuado pero mejor conocido.
- Muchos modelos de decisión han sido diseñados para trabajar con datos difíciles de conseguir fuera del marco teórico.
- Dificultad a la hora de comparar proyectos no homogéneos.
- Los criterios empleados en los modelos no siempre aportan la información necesaria para tomar una decisión satisfactoria, independientemente de cuantos criterios se consideren en los modelos.
- Pocos modelos incorporan las interdependencias entre proyectos y tampoco las experiencias y conocimientos de los gestores más cercanos a los mismos.

En este estudio se pretende encontrar un método formal de toma de decisiones que permita salvar estos obstáculos y que pueda aplicarse en diversos ámbitos. La gestión de las tareas de mantenimiento de instalaciones eléctricas es una aplicación práctica que se analiza en profundidad.

Estas tareas tienen características comunes con otros casos de estudio [BBH⁺02] en los que es necesaria una decisión clara, transparente, comprensible y reproducible.

- Se requiere la participación de varios niveles de gestión
- Involucra varios escenarios.
- Debe ajustarse a la regulación institucional.
- Afecta a las necesidades de nueva financiación o puede redirigirla.

- Condiciona nuevas instalaciones o reformas de las existentes.
- Conviven alternativas con elevado riesgo económico o tecnológico.
- Las decisiones tendrán consecuencias en el futuro.

Siguiendo las teorías expuestas en los modelos habituales de toma de decisión, el proceso de toma de decisión comienza con la definición del problema que se quiere estudiar, antes de establecer los requerimientos y objetivos que deben cumplirse y los métodos que se emplearán para evaluarlos.

No obstante, la idea original de este estudio, más allá de resolver un problema laboral específico, es contribuir al incremento de conocimientos científicos sobre el problema clásico de selección de proyectos. Al plantear las preguntas necesarias para indentificar la metodología de estudio, se prestó atención a que no establecieran límites al estudio de su utilidad en otros campos diferentes al del caso práctico. Esta idea ha condicionado la solución final y es la justificación última de haber elegido este tema para esta Tesis Doctoral.

El método de tres etapas (soportado por una base de conocimiento del dominio que se estudia) desarrollado en el contenido del documento es consistente, replicable y generalizable y, por tanto, cumple con las características del rigor científico. Lo mismo ocurre con los métodos utilizados para identificar variables y medir su influencia.

La solución propuesta contribuye, por tanto, a aumentar el conocimiento sobre la disciplina estudiada, y, adicionalmente, aporta nuevos caminos de investigación al incorporar herramientas de otras ciencias, como la ingeniería, la filosofía y la informática, aplicando conceptos propios de dichas disciplinas en campos alternativos.

Finalmente, la propia incorporación de esta visión, abre líneas de investigación futura que serán expuestas en las conclusiones del documento.

1.2. Planteamiento del problema.

La definición del problema es el paso crucial en la toma de una buena decisión. Si está bien planteada permitirá acometer sin dudas las siguientes fases del proceso de la toma de decisión al asegurar que todos los esfuerzos van encaminados en la dirección correcta. Nuestro objetivo será partir de una definición del problema en una declaración que incorpore las condiciones iniciales y las condiciones deseadas antes de decidir el método de decisión que se empleará para resolverlo. Sin embargo, con carácter previo a este objetivo, se hará una revisión del entorno en el que se enmarca el problema en estudio.

1.2.1. Enunciado del Problema

Consideremos un conjunto de instalaciones, que componen un sistema estructurado mantenible. Cada instalación está formada por diversos elementos con una función concreta. Tanto instalaciones, como elementos sufren modificaciones a lo largo del tiempo que provocan cambios de estado. Es decir, el sistema estará en continua evolución. Como en los sistemas biológicos, los cambios o mutaciones pueden ser lentos o rápidos ¹. En ambos casos, el sistema podría dejar de funcionar como estaba previsto. Para mantener el sistema en funcionamiento habrá que emprender distintas acciones de mantenimiento. Determinar qué actividades se realizarán en un periodo de tiempo de programación y sobre qué elementos concretos cuando una mutación es detectada es uno de los objetivos de los gestores de mantenimiento de instalaciones.

Cuando se identifica una pérdida de funcionalidad del sistema [¹], incluso aunque dicha pérdida sea hipotética en el momento actual, es necesario tomar decisiones de mantenimiento para identificar las tareas que es necesario realizar al objeto de devolver la funcionalidad al sistema.

En primer lugar, habrá que determinar si la pérdida de funcionalidad justifica iniciar las tareas de reparación o sustitución del componente del sistema que falla (o podría fallar) o, por el contrario, dicho componente puede seguir funcionando en su estado actual dentro del sistema. La opción "*No hacer nada*" es una solución válida, en la que habrá que considerar las consecuencias futuras para el sistema mediante análisis de riesgos basado en probabilidades de ocurrencia de eventos.

Al mismo tiempo, debe valorar la afección que para el resto de las tareas puede suponer la incorporación de la nueva, en forma de costes directos o indirectos o en forma de incremento del periodo de realización o finalización. Con estos datos el responsable de mantenimiento debe tomar una decisión que dé respuesta a las siguientes preguntas:

- ¿Qué variables debo tener en cuenta al analizar este problema?
- ¿Es necesario realizar acciones de mantenimiento para resolver este problema?

Si la respuesta es positiva habrá que responder a estas dos preguntas adicionales:

- ¿Cuándo será el mejor momento para realizarla?
- ¿Quién y con qué medios la podrá ejecutar?

Mientras se buscan las respuestas a estas cuestiones, es preciso recordar que ya existían tareas cuyo curso debe continuar para cumplir con todos los objetivos de mantenimiento de sistemas.

¹Una mutación lenta se produce por envejecimiento de los materiales. Una mutación rápida será un fallo brusco de un material o equipo que provocará una avería de funcionamiento.

A lo largo de este trabajo hablaremos de problemas, tareas, trabajos, operaciones o actividades de mantenimiento. Dependiendo del contexto, podrían representar distintos conceptos según la fase de planificación en curso. Sin embargo, independientemente del significado, el problema se puede asimilar en todos los casos al problema de selección de una cartera de proyectos que, según la metodología de toma de decisión, habrá que intentar encuadrar dentro de las siguientes opciones posibles [Cas96]:

- Aceptación o no del proyecto considerado individualmente.
- Selección de un único proyecto de entre un conjunto de alternativas excluyentes.
- Selección de un subconjunto de alternativas dentro de un conjunto de proyectos aceptables debido a la existencia de restricciones activas en los recursos disponibles para acometer varios proyectos.

En la práctica, el responsable de mantenimiento se ve obligado a responder secuencialmente a los tres tipos de problema.

- En primer lugar, tiene que decidir si el problema detectado le afecta lo suficiente como para iniciar una línea de actuación.
- En segundo lugar, debe escoger entre un subconjunto de alternativas todas ellas aceptables, que se realizarán en un determinado espacio de tiempo.
- Finalmente, a la hora de la programación de las tareas se encontrará con que las alternativas se convierten en excluyentes en cuanto se asignan los recursos para una unidad de tiempo laboral.

La respuesta que se busca no es una lista de prioridades donde se vayan incorporando todas las nuevas tareas modificando las prioridades existentes de acuerdo a la cantidad de recursos disponibles. Si se aplican los métodos de jerarquización a esta tarea de un modo estricto, la prioridad resultante de esta tarea difícilmente se vería afectada por la incorporación de otras tareas e incluso, aunque lo hiciese, las condiciones de entorno ya tienen un papel relevante sobre la prioridad de las tareas del “día siguiente”. Es decir, en las tareas de mantenimiento hay que priorizar aquellas que es posible atender en un periodo de tiempo determinado, por ejemplo un día, aunque su prioridad absoluta sea más baja que otras tareas cuya realización es imposible ese día. Y del mismo modo, si se contempla la repercusión de la paralización de una tarea diaria ya iniciada en la valoración de la prioridad, una tarea con mayor puntuación objetiva, puede verse afectada negativamente por la dificultad de paralizar el trabajo ya iniciado.

Por otro lado, dada la dispersión de la actividad sobre la que hay que tomar decisiones, modelizar el funcionamiento de la empresa de manera detallada resulta una labor titánica e infructuosa, al estilo del trabajo eterno de Sísifo para subir una piedra a la colina y empezar de nuevo cada día, pues la semejanza entre el sistema eléctrico con sus características y un ser vivo, dificultan predecir cómo va a ser su evolución y hacia dónde va a encaminar sus

pasos en el futuro. Incluso pensando en el presente, la duración de la tarea de recopilación de datos para la foto instantánea que modeliza el momento actual, hace que al finalizar la toma de datos, estos ya no sean válidos por desfasados, lo que obligaría a comenzar de nuevo.

En este punto, el concepto de “*Smart Grid*”, que aproxima el concepto de red eléctrica al concepto de red de comunicaciones, puede aportar un cambio de enfoque, pues con esta visión, la propia red física pierde importancia frente a la red lógica. Sin embargo, la red lógica, que puede ser muy útil para definir planificaciones o políticas de mantenimiento orientadas a la consecución final del objetivo de mantener el sistema en funcionamiento, no tiene mucha utilidad a la hora de programar las propias tareas que garantizan la mantenibilidad del sistema.

Una de las premisas del mantenimiento es que cuando las cosas funcionan bien nadie se acuerda de él. Si un responsable toma las decisiones adecuadas para que el sistema funcione correctamente nadie se dará cuenta de su existencia y podrá hacer su trabajo con tranquilidad. Si el sistema llega a fallar por malas decisiones, la repercusión será elevada. La opinión de un usuario del sistema no puede ser controlada por el responsable, pero la presión que dicha opinión y otras opiniones públicas ejercen sobre el decisor condicionan a éste a la hora de decidir. Del mismo modo, la forma de actuar de otras empresas del sector también va a influir sobre las decisiones, así como las tendencias legislativas o de los mercados económicos.

Dedicaremos los siguientes apartados de este trabajo a la búsqueda de un método de ayuda que permita al decisor orientar su camino hacia la toma de buenas decisiones cuando se le plantean cuestiones como las expuestas en los objetivos de esta Tesis, partiendo de unos datos incompletos, mayoritariamente cualitativos y con unos pocos cuantitativos parciales (focalizados solo hacia un aspecto del problema) y basados en funciones de probabilidad, manejando siempre valores de incertidumbre y riesgo elevados. Se hará especial énfasis en el proceso de caracterización del entorno ya que de su modelización dependerá la aplicabilidad de todo el método.

La búsqueda de una solución óptima a partir de un modelo excesivamente ambicioso, considerando muchos parámetros definidos por múltiples datos, no dejaría de ser un bonito ejercicio académico con una difícil aplicación práctica.

1.3. Estrategia de investigación y contribuciones.

La gestión de tareas de mantenimiento sobre instalaciones es una actividad muy dinámica sujeta a continuos cambios y mutaciones. Sobre esta premisa, se planteó orientar la investigación hacia el estudio de los sistemas dinámicos y hacia el modo en que los gestores expertos toman decisiones en esas condiciones. Al abrir esta línea de investigación, la po-

sibilidad de utilizar conceptos de procesos biológicos y físicos incorpora un nuevo espectro de herramientas que tienen en cuenta variables que el decisor trata normalmente de forma cualitativa. Típicamente estas variables serán las variables externas y las internas de tipo cualitativo, como las preferencias del decisor. Puesto que uno de los objetivos es obtener una herramienta de ayuda a la decisión, conocer cómo funciona el razonamiento humano detrás de las decisiones de asignación de trabajos tiene una especial relevancia. Desde el principio se aplicó un enfoque pragmático, que además de cumplir un objetivo de utilidad, aporta luz a la investigación analizando las causas y efectos tanto de la influencia de las variables como de las decisiones. El análisis de las relaciones causales, tratar procesos como cajas negras con entradas y salidas y el concepto de control adaptativo fueron inicialmente ideas tomadas de otros campos de la experiencia personal, cuya aplicación al caso de estudio se consideró interesante explorar. El enfoque práctico también está detrás del planteamiento global del proceso de toma de decisiones. Considerar el proceso de gestión de trabajos como un todo ha orientado todo el proceso de elaboración de este trabajo primando la sencillez y la eficacia de los modelos y estableciendo la importancia de las conexiones entre el modelo teórico y la realidad que se quiere representar. El enfoque propuesto ha llevado a analizar combinaciones de técnicas existentes en diferentes disciplinas para desarrollar un método genérico, con aplicación inmediata en la ayuda a las organizaciones en la gestión de sus tareas de mantenimiento, pero también aplicable en otras disciplinas sin cambios conceptuales.

1.4. Organización del documento.

El presente documento está organizado en cuatro capítulos centrales.

El primero de ellos, Capítulo 2 aborda:

- En qué consisten las labores de mantenimiento de las instalaciones eléctricas, realizando una introducción somera del entorno, físico y normativo, que rodea dichas labores.
- La importancia de acertar en la selección de las tareas que es necesario realizar en un periodo determinado de programación de trabajos.
- Los conceptos matemáticos de sistema y estado.
- Las dificultades de conseguir los datos necesarios para modelar sistemas de gran tamaño y complejidad. Por otro lado, se introducen modelos diseñados para resolver esos problemas.
- Los métodos de selección disponibles para cada uno de los problemas:
 - El problema de aceptación o no de un proyecto considerado individualmente.

- El problema de selección de un subconjunto de alternativas dentro de un conjunto de proyectos aceptables.
- El problema de selección de un único proyecto de entre un conjunto de alternativas excluyentes.

En el capítulo 3:

- Se plantea el problema de planificación de trabajos como un problema de selección de proyectos.
- Se explica el modelado de sistemas mediante ecuaciones matemáticas, cómo se representan y relacionan las variables que intervienen en un proceso.
- Se comparan los métodos racionalista y del caso para identificar las variables relevantes para la selección de proyectos.
- Se estudia el razonamiento basado en el caso como herramienta de representación del conocimiento de las variables.
- Se analiza el control de procesos y cómo influyen las variables sobre los mismos.

Tras la exposición teórica de los capítulos anteriores, en el capítulo 4:

- Se expone una aplicación práctica centrada en el mantenimiento de instalaciones eléctricas.
- Se describen las bases de datos del conocimiento. Sobre ellas se procesarán los datos necesarios para el modelo de decisión.
- Se expone el funcionamiento de la herramienta de Ayuda a la decisión para la selección de tareas e incorporación en programación.

En el capítulo 5:

- Se desarrollan las tres etapas que componen la herramienta de decisión sobre un conjunto real de tareas: 1. Etapa de Aceptación. 2. Etapa de Programación. 3. Etapa de Asignación.
- Finalmente se hace un análisis comparativo: Modelo teórico frente a caso real.

Se finaliza el estudio con las conclusiones.

Notas

¹Un caso real de decisión se produce cuando un fabricante, suministrador de múltiples elementos para la red de distribución en distintas partes del mundo, detecta por sus procedimientos de calidad que determinado lote de uno de sus productos tiene una tasa de fallo del 25% pasado dos años de su fabricación. Inicia una campaña de comunicación a sus clientes y contacta con el departamento de Mantenimiento, de una empresa distribuidora que utilizaremos como muestra, para notificarle que tiene en su poder 2200 equipos de ese lote y el riesgo de fallo que ello supone. El responsable de la empresa tiene localizados en instalaciones en servicio un total de 2000 elementos en instalaciones en servicio y otros 200 en almacenes. El fabricante se compromete a asumir el coste de su producto, entregando uno libre de defectos por cada equipo defectuoso que se le entregue, pero no se responsabiliza de los costes indirectos y del lucro cesante que se genere en la sustitución. En los equipos almacenados el coste para la distribuidora es residual de la propia gestión de los equipos, pero en la sustitución de los elementos instalados los costes de gestión del cambio y de la propia sustitución tienen un peso significativo, pues podría ser necesario gestionar un cambio de las condiciones de funcionamiento de la red (recursos de explotación), desplazar equipos para realizar la sustitución en cada instalación dispersa geográficamente (recursos de sustitución) y trasladar los elementos, el sustituido y el sustituto, entre origen y destino: el sustituto desde el almacén a la instalación y el sustituido desde la instalación al almacén (recursos de transporte). La suma de estos costes y del resto de costes indirectos componen el coste mínimo esperado para la tarea de sustitución. Además de la repercusión de esos costes en el presupuesto anual, el responsable de mantenimiento debe contar con la distribución temporal impuesta por el entorno. Es decir, incluso suponiendo que los recursos son ilimitados en su empresa distribuidora, el fabricante establece limitaciones por su proceso de fabricación, los transportistas emplean un tiempo mínimo de transporte en llegar desde la fábrica al almacén, los empleados utilizan unos tiempos en desplazarse hasta las instalaciones, las instalaciones tienen restricciones técnicas que hacen imposible disponer de todas ellas simultáneamente, obligando por tanto a una determinada secuencia de actuación, etc. La suma de estos tiempos dará la duración mínima esperada para la tarea de sustitución. Por otra parte, el responsable de mantenimiento debe considerar que, en el tiempo que el producto lleva instalado en su empresa, la tasa de fallo observada puede ser muy diferente a la predicha por el fabricante. Podría ser muy inferior por lo que la noticia trasladada por el fabricante incluso le podría parecer demasiado alarmista o podría ser muy superior y considerarla insuficiente. Esta percepción va a tener un peso considerable sobre la decisión que tiene que tomar.

Capítulo 2

Teoría del Problema.

2.1. Descripción general del entorno.

Según la definición dada por REE([dE09]) un sistema eléctrico *“es el conjunto de elementos que operan de forma coordinada en un determinado territorio para satisfacer la demanda de energía eléctrica de los consumidores.”* Los sistemas eléctricos están constituidos por los siguientes elementos:

1. Centrales de generación donde se produce la electricidad (Centrales Térmicas, hidráulicas, ciclos combinados, parques eólicos, fotovoltaicos, . . .)
2. Líneas de transporte de la energía eléctrica en alta tensión.
3. Estaciones transformadoras (Subestaciones) que elevan/reducen la tensión de las líneas para facilitar el trasvase de energía.
4. Líneas de distribución de media y baja tensión que llevan la electricidad a los puntos de consumo.
5. Elementos de control supervisando la operación de todo el sistema.

La energía eléctrica tiene una característica muy importante que condiciona su uso: no es posible almacenarla en grandes cantidades durante periodos largos de tiempo. Por esta razón es necesaria una coordinación completa en cada elemento del sistema para que pueda ser consumida en el momento en que surge la demanda. Esta peculiaridad distingue este sistema de otros problemas de producción o distribución clásicos en el mundo empresarial.

Un sistema eléctrico tradicional produce la energía en grandes centrales ubicadas en un punto cercano a las materias primas (ríos, minas, . . .) y alejado de los principales puntos de consumo (ciudades). El sistema de transporte y distribución se encarga de aproximar la energía generada a los consumidores, utilizando una red muy semejante a una estructura arbórea donde los elementos se van ramificando a partir de la red de transporte (red

troncal), reduciendo la tensión y aumentando la ramificación (red de distribución) a medida que se aproximan al consumidor final [Wil00].

La gestión de la generación está cambiando en los últimos años, desde la concepción clásica de grandes centrales a una nueva era en la que las tecnologías actuales permiten el uso de generación distribuida, mucho más cercana al punto donde se demanda la energía, con unos costes muy competitivos.

También está evolucionando la concepción de la demanda con la llegada del neologismo "Smart Grid", que introduce la virtud de la gestión del consumo para conseguir mayores beneficios.

El sistema de transporte y distribución tiene por misión fundamental entregar energía eléctrica a los consumidores allí donde la energía vaya a ser consumida y en el estado correcto para el consumo. Para conseguir esta misión se requiere el cumplimiento de varios hitos:

1. Debe existir un camino entre el consumidor y la central generadora que sea directo y con la capacidad suficiente para transportar la energía demandada por ese cliente. Ese camino puede ser común en determinados tramos, pero siempre tendrá un tramo individual, por lo que si se habla de millones de clientes hay que hablar de millones de caminos o, lo que es lo mismo, millones de instalaciones.
2. El camino entre consumidor y generador debe ser fiable, aportando continuidad y estabilidad en el flujo de energía para no alterar el comportamiento del consumidor. En el mundo actual la fiabilidad que se pide a un sistema eléctrico está muy por encima de lo que se considera razonable en otros sectores: Una continuidad de suministro de "solo" el 99,9994% durante un año en un cliente urbano de baja tensión, podría acarrear sanciones económicas para la empresa eléctrica que reportase ese valor según la legislación vigente en España que establece 6 horas de interrupción máxima a un cliente en zona urbana [Esp00].
3. El producto entregado debe cumplir las expectativas del cliente, es decir, debe cumplir los requisitos físicos necesarios para que pueda ser empleado por el consumidor final de acuerdo a la reglamentación y normalización que se aplica en cada punto de consumo.

En España se promulgó la Ley 54/1997 que regula la actividad de transporte y distribución con la expresa finalidad de adecuar el suministro de energía eléctrica a las necesidades de los consumidores, racionalizando, maximizando la eficiencia y optimizando dichas actividades [Esp97]. El Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre, desarrollando dicha ley, fija las normas para las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica. El artículo 38 define las redes de distribución (el camino entre productor y consumidor) como "*todas aquellas instalaciones eléctricas de tensión inferior a 220 kV salvo aquellas que, de acuerdo con lo*

previsto en el artículo 5 del presente Real Decreto, se consideren integradas en la red de transporte. Así mismo se considerarán elementos constitutivos de la red de distribución todos aquellos activos de la red de comunicaciones, protecciones, control, servicios auxiliares, terrenos, edificaciones y demás elementos auxiliares, eléctricos o no, de destino exclusivo para el adecuado funcionamiento de las instalaciones específicas de las redes de distribución antes definidas, incluidos los centros de control en todas las partes y elementos que afecten a las instalaciones de distribución.” [Esp00]. Y el artículo 40 introduce el concepto de gestor de la red de distribución de una zona eléctrica, que será la empresa distribuidora propietaria de las instalaciones en esa zona. Entre las funciones de los gestores de las redes de distribución cabe destacar, por su importancia para el caso en estudio, las siguientes:

- *Coordinar las actuaciones de maniobra y mantenimiento que se lleven a cabo en el ámbito de su zona eléctrica de distribución así como con los gestores de redes de distribución colindantes.”*
- *”Participar como proveedores en el servicio complementario de control de tensión de la red de transporte, de acuerdo con los procedimientos de operación establecidos por el operador del sistema. Para ello gestionará los elementos de control de tensión disponibles en el ámbito de su zona generadores, reactancias, baterías de condensadores, tomas de los transformadores, etc. , conforme a lo establecido en los procedimientos de operación de las redes de distribución que se desarrollen.”*

Y, sobre las obligaciones que define el artículo 41 del RD1955/2000, tendrán especial relevancia:

- Suministrar energía eléctrica a los consumidores a tarifa o a otros distribuidores en los términos establecidos reglamentariamente.
- Realizar sus actividades en la forma autorizada y conforme a las disposiciones aplicables, prestando el servicio de distribución de forma regular y continua con los niveles de calidad establecidos en el presente Real Decreto y sus disposiciones de desarrollo.
- Maniobrar y mantener sus redes de distribución de acuerdo con los procedimientos de operación de la distribución que se desarrollen.
- Atender en condiciones de igualdad las demandas de nuevos suministros eléctricos y la ampliación de los existentes, con independencia de que se trate de suministros a tarifa o de acceso a las redes, en las zonas en las que operen, sin perjuicio de lo que resulte de aplicación del régimen de acometidas establecido en el presente Real Decreto.

Por otra parte, el artículo 42 establece que todos los elementos integrantes de las instalaciones de la red de distribución deberán disponer de un equipamiento adecuado para poder atender a las necesidades técnicas requeridas, garantizando la seguridad de las mismas, cumpliendo con los procedimientos de operación de las redes de distribución que se aprue-

ben al respecto y estar dimensionadas con capacidad suficiente para atender la demanda teniendo en cuenta las previsiones de su crecimiento en la zona.

El RD1955/2000 define la calidad de servicio (las expectativas que debe cumplir el producto para satisfacer al cliente) como “conjunto de características, técnicas y comerciales, inherentes al suministro eléctrico exigibles por los sujetos, consumidores y por los órganos competentes de la Administración.”. La calidad de servicio viene configurada por el siguiente contenido:

1. Continuidad del suministro, relativa al número y duración de las interrupciones del suministro.
2. Calidad del producto, relativa a las características de la onda de tensión.
3. Calidad en la atención y relación con el cliente, relativa al conjunto de actuaciones de información, asesoramiento, contratación, comunicación y reclamación.

Y se diferencia este concepto en función de la extensión. Así se hablará de “calidad individual” aplicable a cada consumidor en cada punto de suministro con contrato y de “calidad zonal”, refiriéndose a una determinada zona geográfica atendida por un único distribuidor.

La Ley 54/1997 supuso el fin de una larga etapa en la regulación del sistema eléctrico, pues se cambia la noción de servicio público por la de servicio esencial, es decir, la expresa garantía del suministro a todos los consumidores demandantes del servicio dentro del territorio nacional. Y se liberaliza el sector, quedando solo bajo el control del Estado la actividad del Transporte. El resto de actividades destinadas al suministro de energía eléctrica se ejercerán bajo el principio de la libre competencia, esto es, con libertad a la iniciativa empresarial para el ejercicio de dichas actividades.

Bajo estas premisas, el Real Decreto 1955/2000 solo regula la Planificación de la red de transporte, cuyo horizonte temporal se fija en cinco años, y se basa en los siguientes principios generales:

- “El desarrollo de la red debe cumplir los requisitos de seguridad y fiabilidad para las futuras configuraciones de la red y debe ser económicamente justificable por una reducción de costes derivados de una gestión más eficiente del sistema resultante o por una operación más segura que minimice la energía no suministrada”.
- La obligación de suministro por parte de los suministradores será tenida en cuenta en los criterios de planificación.
- La integración de criterios medioambientales para minimizar el impacto medioambiental global.
- La evolución de las redes de transporte y de distribución tendrá que ser coordinada, así como la entrada de nuevos agentes productores y consumidores, con objeto de mantener la coherencia en el desarrollo del sistema eléctrico en su conjunto.

Las empresas distribuidoras están afectadas por los mismos principios, sin embargo, la libre iniciativa empresarial queda condicionada por la propia regulación, ya que, al ser un monopolio natural, se fija la retribución para evitar posiciones de abuso y se obliga a atender cualquier petición de los clientes ubicados en una zona de distribución dentro de unos plazos y a un precio fijado, en muchas ocasiones, por decreto.

Las empresas distribuidoras de electricidad, tradicionalmente, tenían fijada la retribución de su actividad reglamentariamente atendiendo a los siguientes criterios [Esp13]: a) costes de inversión, b) operación y mantenimiento de las instalaciones, c) energía circulada, d) modelo que caracterice las zonas de distribución, e) los incentivos que correspondan por la calidad del suministro y la reducción de las pérdidas, f) otros costes necesarios para desarrollar la actividad. En 2008 el Real Decreto 222/2008, de 15 de febrero, por el que se establece el régimen retributivo de la actividad de distribución de energía eléctrica, propone una revisión del régimen económico de la actividad de distribución de energía eléctrica, de forma que se superen las deficiencias derivadas, en primer lugar, del hecho de que los incrementos anuales de la retribución de la actividad de distribución eléctrica se establecen a nivel global para todo el conjunto de empresas, sin considerar las especificidades propias de cada zona geográfica (en especial, las variaciones zonales de la demanda), lo que no retribuye adecuadamente la inversión en aquellas zonas en las que la demanda crece por encima de la media. Por otra parte, dicho régimen no tiene en cuenta incentivos orientados a la mejora de la calidad, ni a la reducción de pérdidas, necesarios para inducir a las empresas a invertir para la consecución de estos objetivos en beneficio de los consumidores [Esp08].

Los criterios para la determinación de la retribución de la actividad de distribución por el desarrollo y gestión de redes de distribución tienen por objeto incentivar la mejora de la eficacia de la gestión, la eficiencia económica y técnica y la calidad del suministro eléctrico, así como la reducción de las pérdidas de las redes de distribución. Se determinará atendiendo a periodos regulatorios de cuatro años de duración. Este tipo de esquema es conocido como regulación por incentivos [LT93]. En concreto, hoy en día la actividad de distribución en la mayoría de los países europeos y también en otras partes del mundo, se regula mediante fórmulas de limitación de precios (*price cap*) o limitación de ingresos (*revenue cap*) por periodos plurianuales de 4 o 5 años. La ventaja de este modelo es que incentiva la eficiencia y la reducción de costes por parte de las empresas, sabiendo estas *ex ante* sus ingresos, y por tanto pudiendo disfrutar de mayores beneficios derivados de una gestión eficiente [Jos06].

Durante los últimos 10 años se han publicado numerosos estudios ([GMS⁺11]) sobre el tema de la retribución de la distribución eléctrica, muchos de ellos avalados por la Comisión Nacional de la Energía, y la planificación de las inversiones en nuevos activos del sistema de distribución. Sin embargo, pocos han profundizado en el tema de la ayuda a la decisión de los gestores del Mantenimiento de los Sistemas Eléctricos de Potencia. La

mayor parte de los estudios se orientan a la búsqueda de un coste de referencia con el que puedan compararse cuantitativamente los costes del mantenimiento para determinar si la retribución que reciben las distribuidoras es adecuado o no.

La Real Academia de la Lengua define el mantenimiento, en su segunda acepción como: “*Conjunto de operaciones y cuidados necesarios para que instalaciones, edificios, industrias, etc. , puedan seguir funcionando adecuadamente*”. Las instalaciones de las empresas



Figura 2.1: Mapa de la red de transporte de España. (Imagen tomado de [dE09])

distribuidoras componen auténticas redes muy semejantes a las que se pueden encontrar en sistemas vivos. Es fácil, viendo la estructura de una red en una determinada zona geográfica como la representada en la Figura 2.1, hacer una analogía con un organismo vivo [CG03]. Herbert Spencer propuso utilizar las leyes naturales de la vida y sus procesos para entender la sociedad. Así, procesos biológicos como son evolución, función, organización y estructura son válidos para explicar la sociedad. Desde el enfoque biológico, cada elemento del cuerpo tiene una función que cumplir para que todo el organismo funcione. Las partes del organismo tienen una relación de interdependencia en la que se necesita de la concurrencia adaptada de todas y cada una de sus partes, y cada parte necesita que las demás funcionen perfectamente para obtener el mejor resultado que se traduce en una mejor calidad de vida.

Esta analogía también puede ser utilizada en un sistema eléctrico, donde cada uno de los elementos que la conforman: instalaciones, mantenedores, usuarios, . . . puede ser considerada como una parte de un sistema vivo con una función concreta para que pueda mantenerse en funcionamiento. Desde este punto de vista biológico, la supervivencia sería el objetivo último de la red de distribución por encima del paradigma económico del Beneficio, que suele emplearse para caracterizar los resultados de las distribuidoras, tal como

señaló Galbraith, defendiendo la supervivencia como objetivo último de las empresas. Como se indicó anteriormente, las redes eléctricas se diferencian de muchos otros sistemas industriales en factores como:

1. **El tamaño.** Tanto en extensión geográfica como en número de componentes.
2. **La dispersión de los elementos que la componen.** En una industria todas las máquinas se concentran en naves que facilitan una cadena de montaje, pero, incluso aunque la industria sea muy grande y tenga varias cadenas de montaje, se puede acceder a todos los elementos de forma concentrada en el espacio; en cambio, los elementos de la distribución eléctrica están distribuidos mayoritariamente por la geografía.
3. **La edad del sistema.** Una fábrica se construye con una tecnología propia de la época; al final de su vida útil se renovará con nueva tecnología o se abandonará la producción, entre ambos estados se producirán procesos de envejecimiento que irán cambiando las características de actuación y que se corregirán o no manteniendo la planta en funcionamiento. Independientemente de que se introduzcan elementos nuevos en las instalaciones, la edad de la planta siempre se puede fijar con bastante precisión. En cambio, una red de distribución se construye por etapas a partir de un plan de electrificación zonal. Desde finales del siglo XIX se vienen haciendo estos planes a lo largo de todo el mundo y siguen generándose a medida que avanza el desarrollo de los núcleos urbanos. Una vez hecha la inversión inicial en una época dada, el crecimiento vegetativo de la población humana determina la evolución de la red de distribución; sin embargo, el incremento de la población no sigue un patrón determinista, por lo que la nueva red se va a imbricar con la red existente hasta el punto de que, a partir de un corto periodo de tiempo, resulta difícil afirmar que un tramo de red pertenece a una época determinada, puesto que cada uno de los elementos que la componen puede pertenecer a épocas diferentes.

Estos factores diferenciales hacen que resulte muy difícil aplicar conceptos del mantenimiento industrial a toda la red. Así, el fallo del sistema, entendido como la pérdida de capacidad para realizar las funciones requeridas o satisfacer los requisitos especificados, solo puede aplicarse disgregando la red o sistema en subredes o subsistemas. Un suceso que causa la pérdida de la capacidad de realizar la función para la que fue concebido el subsistema, puede no afectar a la capacidad de seguir realizando su función al subsistema de rango superior ¹.

¹Supongamos un sistema definido por una red mallada de cuatro nodos en los vértices de un cuadrado que representan cuatro ciudades a las que hay que suministrar energía. Los lados del cuadrado representan las líneas de distribución. Cada línea es un subsistema cuya misión es transportar energía entre dos nodos. Un suceso que incapacita una de las cuatro líneas para su misión, pone en estado de fallo ese subsistema, sin embargo el sistema de distribución sigue siendo capaz de transportar la energía a las cuatro ciudades, por lo que es necesario analizar múltiples estados para definir el estado de funcionamiento del sistema.

Las tareas de mantenimiento, según [Kne96b], son el conjunto de actividades que debe realizar el usuario para mantener la funcionalidad del elemento o sistema. Las características de diseño son importantes y condicionan el mantenimiento y la disponibilidad del servicio, pero una vez que el sistema ha entrado en funcionamiento toman el relevo los recursos disponibles y las restricciones para el usuario. En las redes eléctricas de distribución, tal como se comentaba anteriormente, el diseño está condicionado por factores como la tecnología disponible en cada momento, pero también por la esperanza de retribución de una determinada inversión. Así, cuando se construye una nueva instalación tiene un peso muy importante la consideración que para el regulador tenga la misma, puesto que la empresa distribuidora optará por aquella tecnología que, cumpliendo las normativas vigentes, permita atender los requisitos demandados con el mayor beneficio esperado según los parámetros de rentabilidad utilizados para cada una de las diferentes empresas. Esos mismos parámetros de rentabilidad, también afectarán a los recursos: personal de mantenimiento, elementos de reparación, inventario de repuestos, herramientas, equipos de prueba, comprobación metrológica y calibración, disponibilidad de datos técnicos (instrucciones de mantenimiento, información sobre instalaciones, planos y especificaciones, . . .) así como a los recursos informáticos tanto hardware como software, imponiéndoles restricciones presupuestarias en primera instancia, convirtiendo los recursos en limitados. Cada limitación genera una restricción de programación en el tiempo disponible de los recursos existentes. A estas restricciones habrá que añadir las impuestas por la normativa de seguridad de personas y equipos, por los factores climatológicos que afectarán a la hora de la programación, etc.

Las tareas de mantenimiento se suelen clasificar en tres categorías clásicas:

1. **Tareas de mantenimiento correctivo.** Se realizan para recuperar la funcionalidad de un elemento o del sistema tras la pérdida de toda o parte de su capacidad. Las fases que componen esta tarea son:
 - a)* detección del fallo, *b)* localización del mismo, *c)* desmontaje de las piezas dañadas, *d)* recuperación o sustitución de dichos elementos, *e)* montaje, *f)* pruebas y verificaciones.
2. **Tareas de mantenimiento preventivo.** Sirven para reducir la probabilidad de fallo del elemento o sistema o para tratar de maximizar el beneficio operativo, recuperando características de los elementos degradados por el paso del tiempo. Se compone de las siguientes fases:
 - a)* desmontaje de los elementos en mantenimiento, *b)* recuperación o sustitución de las piezas degradadas, *c)* montaje, *d)* pruebas y verificaciones.
3. **Tareas de mantenimiento condicional.** Tratan de determinar, mediante la vigilancia de ciertos parámetros específicos de cada elemento, el momento previo a la pérdida de prestaciones o cambio de estado a fallo de dicho elemento, para realizar

entonces el mantenimiento preventivo. Su fases son: *a)* evaluación de la condición, *b)* interpretación de la condición, *c)* toma de decisiones.

Este último tipo de tarea siempre va seguido de un mantenimiento preventivo si tiene éxito o de un correctivo en caso contrario. Su presencia se justifica desde el momento en el que puede optimizar la vida útil de cada elemento evitando los fallos al alertar de la proximidad de los mismos, mejorando así la rentabilidad de las instalaciones y reduciendo costes de reparación.

Las tareas de mantenimiento de una red de distribución eléctrica, por las características expuestas, representan un factor crítico en la ecuación de rentabilidad. Sin embargo, en una red de distribución ciertos costes son difíciles de analizar y controlar, como, por poner un caso concreto, el coste inicial de mantenimiento necesario para establecer un sistema preparado para la operación o el coste de oportunidad o las consecuencias de no realizar mantenimiento.

Durante los últimos 60 años se ha producido una evolución de la política de realización de las tareas de mantenimiento en todo sistema industrial, incluidas las redes de distribución. Así, considerando el instante de ejecución de las tareas de mantenimiento con respecto al instante de producción del fallo, podríamos establecer las siguientes políticas:

1. **Mantenimiento basado en la producción del fallo.** Una vez se ha producido un fallo en el sistema, se realizan tareas de mantenimiento correctivo a fin de restituir la funcionalidad del sistema. Ésta era la política tradicional del mantenimiento y su principal ventaja radica en el total aprovechamiento de la vida útil de cada elemento. Como desventajas cabe citar que el fallo de un elemento puede causar el fallo de otros elementos que hubieran resistido en servicio de no haberse producido el fallo inicial, encareciendo la reparación y el hecho de que al producirse el fallo en un momento no controlado, es de esperar mayores tiempos de indisponibilidad, ya que, normalmente, el fallo no se producirá cuando todos los elementos necesarios para su reparación estén más a mano. Este tipo de mantenimiento solo produce tareas correctivas.
2. **Mantenimiento basado en la vida del sistema.** Partiendo de la base de que la vida de cada elemento tiene una duración determinada, se establecen tareas periódicas destinadas a sustituir los elementos antes de finalizar su vida útil de manera planificada. Como ventajas presenta la posibilidad de eliminar los fallos y la reducción de la indisponibilidad del sistema, pues la sustitución se hace en el momento en que están disponibles todos los recursos para ello. Como inconveniente principal destacamos la reducción de rentabilidad en el uso de los elementos, pues, sea cual sea su estado, se van a sustituir antes de finalizar su vida útil. Si todo funciona correctamente solo se realizan tareas preventivas.
3. **Mantenimiento basado en la condición.** Surge para salvar el inconveniente del método anterior y parte del principio de que solo será necesario realizar tareas de

mantenimiento cuando se produzca un cambio en la condición del sistema o en las prestaciones esperadas del mismo. Para detectar el cambio se realizarán tareas de inspección periódicas controlando parámetros de envejecimiento o fatiga de los elementos y cuando los indicadores alcanzan el valor crítico se programan las tareas de mantenimiento preventivo necesarias. Entre sus ventajas cabe destacar las siguientes:

- Detección temprana de los problemas.
- Reducción del tiempo de indisponibilidad. La presencia de las alarmas va a permitir manejar mejor los recursos y las tareas.
- Mejora de la seguridad. Es posible detener el sistema en caso de peligro.

Entre sus inconvenientes señalaremos el que no es posible aplicarlo siempre, ya que requiere de elementos adicionales que podrían llegar a encarecer notablemente el sistema. Se realizan tareas de mantenimiento condicionales acompañadas de tareas de mantenimiento preventivo y correctivo.

4. **Mantenimiento basado en la fiabilidad** [NAS00a]. Es un sistema con sus orígenes en la industria aeronáutica cuyo objetivo fundamental es evitar los fallos y la pérdida de funcionalidad del sistema. Las tareas de mantenimiento (correctivas, preventivas y condicionales) se combinan tras analizar las funciones del sistema, las consecuencias de fallo y los modos de fallo de un modo sistemático que permite obtener una mejoría de los resultados en cuanto a disponibilidad, funcionalidad y costes. Actualmente es el tipo de mantenimiento empleado en sectores de gran complejidad como la industria aérea, la espacial o la nuclear y se está expandiendo a otras industrias aunque más lentamente, debido a que requiere un elevado esfuerzo de documentación de los procesos antes de que los resultados comiencen a ser visibles, por lo que sus ventajas no pueden llegar a apreciarse cuando los requerimientos empresariales exigen resultados en el corto plazo. Este proceso de documentación busca responder a las siguientes cuestiones:

- ¿Qué hace el sistema y cuáles son sus funciones?
- ¿Cómo pueden producirse fallos en el funcionamiento del sistema?
- ¿Cuáles son las consecuencias de cada tipo de fallo?
- ¿Qué puede hacerse para reducir la probabilidad de fallo, identificar el origen del mismo o reducir sus consecuencias?

Resulta evidente que documentar esta información puede requerir ingentes cantidades de recursos pues deberían responderse para cada subsistema y elemento, tipificando como puede fallar y analizando las consecuencias de manera estadística a partir de experiencias previas.

La tendencia clara en el sector de la distribución es evolucionar hacia el mantenimiento basado en la fiabilidad. Sin embargo, su implantación todavía es incipiente, estando orientada a equipos cuya importancia en la red, por coste y función como los transformadores y generadores, justifican el esfuerzo de conseguir identificar sus modos de fallo para tratar de adelantarse al mismo, pues su fallo incontrolado se traduce en una indisponibilidad con una repercusión temporal y económica sustancial.

Sobre el resto de los elementos, cuyos fallos son relativamente menos importantes pues su afección económica o funcional sobre el sistema global tiene poco peso de forma individual, los principios de este tipo han calado hondo en los departamentos de mantenimiento; sin embargo, su aplicación formal de manera rigurosa exige un esfuerzo desproporcionado con respecto a los resultados que cabe esperar.

Los principios de esta última generación de mantenimiento se podrían considerar una filosofía de vida dentro de la empresa implicando a toda la organización para conseguir los objetivos y modificando fundamentalmente el diseño de las instalaciones[Sol].

2.2. Decisiones de mantenimiento de instalaciones.

Una vez expuesto cual es el entorno en el que se desenvuelve el problema, vamos a plantear ahora cuales son los problemas de decisión que tienen que resolver habitualmente los responsables de mantenimiento en general y el caso particular de las empresas de distribución eléctrica ². Cada responsable de mantenimiento debe conocer las características y

²Para explicar el proceso hagamos una analogía con un caso cercano: el mantenimiento del propio coche. Cuando se compra un coche el fabricante entrega un libro de mantenimiento con las revisiones programadas (Mantenimiento preventivo basado en el ciclo de vida de los elementos) que va a recibir el coche a lo largo de su vida en función de la experiencia que ha tenido el fabricante en todos los vehículos que han precedido al que acabamos de comprar, en el que supondremos que tiene prevista una revisión cada 10.000km circulados o cada año. Cualquier vehículo actual incorpora un ordenador que gestiona las alarmas de ciertos elementos cuyo fallo puede provocar destrucción de algún elemento vital del propio vehículo o poner en riesgo la seguridad de los ocupantes y esa información se le muestra al conductor en el panel de mandos. La última tecnología permite disponer de más y mejor información, pero todos los vehículos han incorporado todas aquellas alarmas que estaban disponibles en el momento de su fabricación. El conductor actúa como responsable de mantenimiento del sistema Automóvil encargándose de realizar o gestionar todas las tareas necesarias para garantizar que siga cumpliendo su función de llevarle de un sitio a otro. A partir de la información facilitada por el fabricante, sus experiencias en la conducción, la observación de ciertos parámetros del propio vehículo y la disponibilidad de tiempo y dinero para dejar el coche en el taller para que le realicen las tareas necesarias compondrá un plan de mantenimiento para su automóvil. Aunque el vehículo sea exactamente el mismo, el plan de mantenimiento va a depender del entorno en el que se desenvuelve el vehículo y su conductor. El desgaste de neumáticos, el consumo de aceite, los desgastes de rodamientos, ... serán distintos cuando un coche viaja mayoritariamente por autopista que cuando circula por pistas rurales. Decisiones como cuando cambiar los neumáticos en función del estado de alarma por el desgaste, cuando reparar un golpe que afecte solo a la estética del vehículo, si un ruido al circular es suficientemente molesto como para ir al taller o incluso cada cuanto tiempo se lava el vehículo, estarán condicionadas por la capacidad económica del propietario del vehículo además de por la propia percepción/sensibilización que el conductor tenga sobre cada uno de esos temas. Estos mismos condicionantes también afectarán a la elección del taller donde se realizarán las revisiones y reparaciones y qué tipo de actuaciones realizará el propio conductor y cuales serán encargadas a terceros. Comparando sistema vehículo con sistema empresa distribuidora tendremos que el fabricante sería la combinación de los depar-

funciones de los elementos que compone la subred de su ámbito y con ellos establecer un plan de actuaciones que le permita mantener la funcionalidad de la red de distribución a cuyo correcto funcionamiento contribuye.

Como empresa que es, toda empresa distribuidora tiene objetivos económicos que cumplir que van a limitar la cantidad de recursos disponibles. Y como actividad regulada existen unos requisitos legales que fijan tareas mínimas a realizar. El artículo 163 de Real Decreto 1955/2000 establece que las instalaciones de producción, transporte y distribución de energía eléctrica deberán ser revisadas por técnicos titulados, al menos cada tres años, elaborando una certificación expresa del resultado del reconocimiento en la que se refleje el cumplimiento de las medidas reglamentarias o las medidas correctoras necesarias. Las inspecciones reglamentarias aseguran el cumplimiento de las condiciones técnicas de cada elemento de la red. Su misión es garantizar que la instalación sigue manteniendo las mismas características que cuando se realizó el diseño y que ningún elemento representa un peligro para la seguridad de los usuarios o instalaciones. Estas actuaciones representan el mínimo de los costes fijos del mantenimiento.

La liberación del sector energético y del eléctrico en particular, propició la expansión del concepto de *"utility"* multidisciplinar con objetivos de crecimiento en cuotas de mercado y resultados económicos. Puesto que las restricciones técnicas establecen un marco base, los elementos diferenciadores entre empresas deben buscarse en conceptos como la calidad de servicio y atención, la capacidad para anticipar y gestionar las obligaciones reglamentarias, sociales y del medio ambiente, y la racionalización de los costes de los productos y servicios. Para la calidad de servicio las revisiones reglamentarias, que representan el mantenimiento basado en el ciclo de vida de las instalaciones, no suponen un elemento diferenciador, pues un elemento cuyo estado sea correcto el día de la inspección puede sufrir un fallo en el periodo que transcurre hasta la siguiente originando una pérdida de servicio. Pensando en la calidad del servicio y la satisfacción del cliente, se hace imprescindible tomar una senda que conduzca hacia un tipo de mantenimiento que evite los fallos intempestivos o por lo menos los reduzca hasta límites tolerables. Por ese camino es necesario utilizar el mantenimiento basado en la condición para tratar de determinar el momento en el que se va a producir el fallo y adelantarse en la eliminación de la causa futura que lo causará. Este tipo de mantenimiento basado en la condición exige recursos que crecen proporcionalmente con la cantidad de condiciones que se pretende evaluar. Es en esta partida, que también forma parte de los costes fijos del mantenimiento, donde las empresas distribuidoras tienen más grados de libertad a la hora de fijar sus objetivos. La tecnología disponible a día de hoy pone al alcance de las empresas la monitorización de parámetros impensables hace tan sólo 20 años atrás. Sin embargo, la economía de escala que hay que aplicar a la hora de monitorizar determinados parámetros de ciertos elementos marca diferencias entre

tamentos de planificación y construcción de nuevas instalaciones. Y el conductor serían los responsables de las distintas áreas organizativas. Dado el tamaño del "vehículo" que hay que conducir, es necesario hacer un reparto de responsabilidades entre diferentes unidades multidisciplinarias que atienden a subsistemas geográficos y unidades especializadas que se encargarán de elementos específicos de la red de distribución.

empresas. Simplificando un poco, para cada uno de los elementos del abanico de ellos que componen la red, existen diferentes parámetros monitorizables. Cada parámetro o conjunto de ellos puede predecir, con las herramientas adecuadas, una tipología de producción de fallo. Los métodos de desencadenamiento del fallo pueden tener diferente incidencia en las redes por diversos factores: la climatología, la contaminación, la disposición geográfica, los criterios constructivos, etc. Por lo tanto, las empresas van a dar más importancia a realizar el despliegue de un programa de monitorización de parámetros en ciertos elementos cuyo fallo es más preocupante en su red³.

Una vez decidido qué parámetros hay que monitorizar para cada elemento, la segunda decisión diferencial sería qué elementos se monitorizan y la tecnología empleada para ello. Cada empresa puede tomar diferentes criterios de priorización: repercusión para la calidad del servicio en caso de fallo del elemento, coste de la reparación en caso de fallo, riesgo para otras instalaciones, costes de instalación y mantenimiento, disponibilidad de las instalaciones para realizar la instalación, etc⁴.

Finalmente, el tercer elemento de decisión que va provocar diferencias, será el plazo temporal que cada empresa asigne a un plan de monitorización de los parámetros definidos en los elementos seleccionados. Puede darse la situación de que una empresa monitorice el estado de envejecimiento del aislamiento de todos sus cables todos los años, porque así se lo aconseja su experiencia para evitar una tasa de fallo elevada en ese elemento, o puede monitorizarlos cada dos o tres años con lo que necesitaría la mitad o un tercio de los recursos empleados en el primer caso.

Los recursos fijos que la empresa distribuidora pone a disposición de los responsables del mantenimiento vienen condicionados por el estado de salud económica de la empresa. Los recursos variables están condicionados por la salud técnica de las instalaciones. La suma de ambas cantidades determinará el tipo de mantenimiento y la cantidad de tareas que se podrán acometer. Al inicio de cada ejercicio presupuestario, un responsable de mantenimiento tiene que decidir qué tareas puede realizar para mejorar el funcionamiento presente y futuro de la instalación, garantizando que se cumplen los objetivos de mantener la seguridad de las personas por encima de cualquier otro condicionante y tratar de mejorar los resultados del funcionamiento del sistema reduciendo todos los elementos de disfunción que estén a su alcance: pérdidas, interrupciones, desgastes y fatigas, roturas, . . . Dentro de cada

³Una empresa cuya red se ubique en un ambiente marino con contaminación cuyos elementos sufran una rápida degradación por corrosión salina, pondrá más medios para tratar de detectar dicha corrosión que una empresa cuya distribución se haga mayoritariamente en un clima árido a la que no le falla ningún elemento por este tipo de corrosión.

⁴Una red rural con líneas de distribución aérea tiene una elevada necesidad de monitorizar los elementos que componen esas líneas: apoyos, crucetas, aisladores, etc y una baja necesidad de monitorizar el envejecimiento del aislamiento de los cables subterráneos, cuya vigilancia es crítica en instalaciones de tipo urbano donde este es el componente principal de la líneas de distribución. Y en el mismo escenario, la monitorización de la línea se puede hacer mediante inspecciones visuales y mediciones puntuales de temperaturas y espesores realizadas por personal recorriendo a pie toda la línea o utilizando alta tecnología con equipos y sensores de alta resolución montados en helicópteros.

ejercicio presupuestario, debe gestionar sus recursos para atender las tareas planificadas de tipo recurrente y las no planificadas de tipo ocasional que van surgiendo, priorizando unas y laminando en el tiempo otras en función de la repercusión esperada en el objetivo.

La tarea de seleccionar el tipo de tareas que se realizarán a cada elemento de la red y los elementos sobre los que se actuará, es el típico problema de selección de una cartera de proyectos. La literatura que trata de su resolución es muy abundante, tanto en cuanto al problema genérico como en el caso particular de instalaciones eléctricas.

2.3. Definición de Sistemas y sus procesos.

En un sistema industrial es necesario tratar de adivinar el comportamiento futuro del sistema. En ese comportamiento, influyen todos los aspectos que rodean a dicho sistema como son [Dub98]: a) rendimiento, b) disponibilidad, c) fiabilidad, d) coste de ciclo de vida, e) mantenimiento, f) soporte logístico, g) fallos esperados, h) equipos de reparación, i) repuestos, etc.

Todo sistema está formado por componentes. Las principales propiedades de los componentes son:

- Tienen un número de estados discreto y conocido.
- Se conoce el mecanismo de cambio de estado.

En los sistemas reales, los componentes serán los elementos físicos que conforman el sistema. Los estados se eligen arbitrariamente con la única restricción de que sean relevantes para la descripción del comportamiento futuro del sistema. Un estado se describe por medio de una variable b . Para cualquier elemento del sistema dicha variable podrá tomar los siguientes valores:

$$b = \begin{cases} \textit{Elemento} & \text{Operativo y Sano} & \longrightarrow & 0 \\ \textit{Elemento} & \text{Dañado, pero sigue en servicio} & \longrightarrow & 1 \\ \textit{Elemento} & \text{Dañado y fuera de servicio} & \longrightarrow & 2 \\ \textit{Elemento} & \text{Dañado, pero el fallo todavía no ha sido detectado} & \longrightarrow & 3 \\ \textit{Elemento} & \text{Dañado, pero el fallo todavía no ha se puede reparar} & \longrightarrow & 4 \end{cases} \quad (2.1)$$

El mecanismo de cambio de estado se puede describir matemáticamente como:

Una función, de la forma $f_b(t - t_b)$, que representa la densidad de probabilidad de que un componente, que en el instante t_b tiene un estado b , cambie de estado en el instante t y una probabilidad $B_b(t - t_b, b - > b')$ de que un elemento cambie del estado b al b' , teniendo en cuenta que el cambio se produce en el instante t posterior a t_b cuando el elemento pasa al estado b .

El vector de estado se define como: $B = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_n)$ donde b_i representa el estado del componente i .

El espacio (B, t) indica que un sistema se incorpora en el instante t en el vector de estado B .

Un sistema es una colección de componentes que tienen una función real definida en el espacio $\{B, t\}$ que denominaremos función de sistema. Toda función de sistema describe el estado del sistema en relación al vector de estado del sistema y otros posibles factores relevantes.

2.4. Necesidad del modelado de sistemas.

En [Dub98] se identifican tres mecanismos de cambio de estado de un componente⁵. Estos procesos son respectivamente:

- *Procesos estocásticos inherentes al componente.* Son los cambios de estado que se deben a fallos que se producen en el componente debido a su propia naturaleza⁶.
- *Procesos de interacción.* El cambio de estado de un componente se debe a un evento ocurrido en el cambio de estado de otro componente⁷.
- *Procesos externos.* Son los cambios de estado debidos a la influencia del entorno⁸.

Los procesos estocásticos han sido profusamente estudiados en la literatura, siempre imponiendo importantes simplificaciones necesarias para aplicar modelos matemáticos resolubles [Tij03], [LS04]. Uno de los procesos mejor estudiados es el deterioro de los sistemas. Todos los sistemas se deterioran con el paso del tiempo debido al envejecimiento de los materiales. Sin embargo, no existe una única definición matemática que contemple las características de cualquier sistema. Dejando aparte los estudios físico-químicos de los procesos de deterioro y centrandonos en la investigación operativa, resulta innumerable la cantidad de estudios que tratan este tema. Por citar solo unos pocos: [BMZ00], [NC10a], [CWC11a] y [LXYZ07a].

Sin embargo, todos los modelos parten de ciertas hipótesis y simplificaciones que difícilmente se dan en los sistemas reales:

- Los sistemas siempre tienen limitado el número de componentes para facilitar los cálculos.

⁵ En el sistema coche se produce un cambio de estado cuándo: 1. Una rueda del coche pincha. Suponiendo que el coche tiene sensores de presión en los neumáticos, si durante la circulación normal se produce un pinchazo, se activarán los sistemas de asistencia a la conducción para ajustar la velocidad y la tracción hasta que el vehículo se detenga. 2. Comienza a llover mientras el coche circula. El detector automático de lluvia activará los limpiaparabrisas.

⁶ Un pinchazo de una rueda.

⁷ La activación del sistema de control de tracción por la pérdida de presión del neumático pinchado.

⁸ La activación de los limpiaparabrisas cuando empieza a llover.

- Los componentes tienen un número finito de estados, que normalmente se reduce a dos: a. Sano. b. Defectuoso.
- Cuando un componente se daña, se sustituye por otro y el sistema vuelve a tener exactamente las mismas condiciones que en el estado inicial.
- Los tiempos de reparación o sustitución de un componente dañado son despreciables.
- No hay tiempos de espera para la reposición de componentes.

En cambio en los sistemas reales, salvo en los más simples, el número de componentes suele ser lo suficientemente elevado como para hacer difícil el análisis detallado de cada uno de ellos. Cada componente puede tener múltiples estados que van del sano al defectuoso pasando por diversos grados de deterioro, con diferente afección sobre la disponibilidad y salud del sistema. Cuando se sustituye un componente de un sistema complejo, el sistema puede quedar en el estado previo a la reparación o en un estado diferente sin precisar. Los tiempos de reparación o sustitución afectan a la disponibilidad del sistema, pues están condicionados por la asignación de recursos y los tiempos de acopio de los materiales necesarios para la reparación. Tantas variables complican la resolución de problemas con los modelos cuantitativos de optimización, ya que normalmente no se dispone de la información necesaria para modelar adecuadamente el sistema a pesar de que en la actualidad las corporaciones prestan una especial atención a los problemas del conocimiento.

La predicción del futuro, necesaria para todas las labores de dirección de empresas, están basadas en la información y el conocimiento (interno y del entorno) y condicionadas por la complejidad y la incertidumbre [DT01].

En [Zac07] se propone una categorización de las indeterminaciones de la información y el conocimiento alcanzable, en función de la disponibilidad y las capacidades de proceso necesarias:

- Incertidumbre: La información disponible no es suficiente para tener un buen conocimiento del problema.
- Complejidad: La cantidad de datos necesarios dificultan el tratamiento de los mismos debido a las limitaciones propias del decisor [Sim57].
- Ambigüedad: No existe un marco de referencia que se pueda utilizar para garantizar que la interpretación de los datos es correcta.
- Equivocación: Existen datos que pueden conducir a resultados erróneos cuando se interpretan en marcos conceptuales diferentes, bien por ser contradictorios o por ser de carácter competitivo.

La manera de afrontar cada uno de estos problemas es diferente:

- La incertidumbre se puede reducir por distintos medios:

- Consiguiendo información adicional.
 - Desarrollando la habilidad de predecir, inferir o estimar el estado futuro a partir de datos incompletos con un nivel de confianza y fiabilidad razonable.
 - Desarrollando la flexibilidad de adaptarse a los eventos imprevistos.
 - Reservas de recursos.
- La complejidad se presenta cuando el número de situaciones o de relaciones entre ellas es demasiado grande para ser procesado. Es pues, un término relativo que depende de la capacidad de las personas u organizaciones. La manera habitual de afrontarla consiste en:
 - Aumentar la capacidad de proceso: nuevos expertos, más recursos,...
 - Descomponer el conjunto en partes más sencillas cuando es posible, de forma que el resultado final se obtiene integrando todos los elementos diferenciales.
 - La ambigüedad representa la falta de claridad o la incapacidad para interpretar algo de forma absoluta. Puede resolverse por alguno de los siguientes caminos:
 - Redefinir el problema para concretar algún aspecto.
 - Aprender más sobre el problema, por medio de experiencias o conocimientos del entorno propios o ajenos.
 - Eligiendo un marco interpretativo aceptado por otros.
 - La posibilidad de equivocación se refiere a la existencia de varias interpretaciones del mismo hecho. Cada interpretación es válida por si misma, pero en la comparativa con las demás aparecen diferencias, exclusiones o conflictos. Los métodos clásicos de solventar estas situaciones pasan por discusiones interactivas o interpretativas y por procesos de negociación.

Las dificultades para conseguir los datos necesarios para modelizar un sistema suponen un grave inconveniente en la resolución de problemas que en general se descompone en dos fases diferenciadas [MF13]:

1. Crear un modelo de representación del problema.
2. Usar el modelo para obtener una solución.

Cuanto más preciso sea el modelo, más fiable será la solución obtenida. Por contra, tal como se ha expuesto en los apartados anteriores, será más complicado de construir y mucho más exigente en cuanto a la información necesaria.

La representación matemática de problemas complejos se ha estudiado profusamente durante las últimas décadas desde el punto de vista de la implementación de algoritmos para su resolución computacional. En [Kar72] se recopilaban 21 problemas que tratan

sobre combinatoria y teoría de grafos, sobre los que se han planteado muchos modelos que permiten afrontar problemas complejos. Entre los problemas más conocidos y estudiados se encuentran el Problema de Satisfacibilidad Booleana (SAT), Problema del Agente Viajero (TSP), Programación No Lineal (NLP), Problema de Asignación Secuencial de Tareas (JSSP) y el Problema de rutas de vehículos (VRP).

Como hemos expuesto anteriormente, el mantenimiento de equipos es una disciplina compleja que engloba multitud de aspectos y conocimientos. Solo los años de experiencia acumulada y compartida permiten afrontar con garantías esta actividad, en la que la capacidad de análisis es primordial en la toma de decisiones. Partiendo de esta premisa y con el concepto de la "*racionalidad limitada*" de Simon [Sim57] en mente, este capítulo va a centrarse en el planteamiento matemático de las operaciones más significativas y características a las que tiene que dar respuesta todo mantenedor de sistemas distribuidos.

Cuando se detecta un problema, el responsable de mantenimiento debe decidir si tiene que actuar o no. Elegir el tipo de acción requerida y programar las acciones necesarias para llevarla a cabo con los recursos disponibles. Es decir, se enfrenta secuencialmente a los tres tipos clásicos de desarrollamos a continuación.

2.5. Aceptación o no del proyecto considerado individualmente.

El primero de los problemas se puede modelar matemáticamente como un problema de satisfacibilidad booleana donde la función objetivo busca la respuesta, afirmativa o negativa, de la pregunta ¿Es necesario actuar ya? El problema de la satisfacibilidad booleana es un problema **NP-completo!** (**NP-completo!**) donde interesa saber si una expresión booleana, con variables y sin cuantificadores, tiene asociada una asignación de valores para sus variables que hace que la expresión sea verdadera. Como se indica en [MF13], se suele representar como una cadena binaria de longitud n . Cada elemento de la cadena corresponde a una variable del problema. El espacio de búsqueda de soluciones del problema tiene una dimensión $2n$, pues hay $2n$ cadenas binarias de longitud n . Cada punto del espacio de búsqueda es una solución factible. Es un problema utilizado en el mundo de la computadoras y en el de los problemas de decisión, pues muchos problemas complejos pueden resolverse aplicando SAT por descomposición del sistema en otros más simples.

Este problema ha generado cantidad de literatura desde que en el año 1971 Cook [Coo71] demostró que era un problema **NP-completo!**. Desde entonces se han planteado múltiples variantes para resolverlo [GJ90] y en los últimos años se están aplicando con éxito soluciones basadas en algoritmos genéticos.

En las operaciones de mantenimiento es muy frecuente encontrar este tipo de problemas, aunque también se suelen plantear como problemas de optimización. En este campo, el

problema se resuelve tradicionalmente por la intervención del razonamiento, experiencia y conocimientos del responsable debido a que, por su propia naturaleza, resulta complicado encontrar un algoritmo que lo resuelva.

El modelo matemático de este problema es el siguiente [GPFW99a]:

Sean las variables booleanas:

$$x_1, x_2, \dots, x_n$$

con las cuales se pueden conformar m cláusulas C_1, C_2, \dots, C_m , de modo que cada cláusula es una disyunción de una o más variables x_i :

$$C_i = x_1 \vee x_2 \vee \dots \vee x_k = \bigvee_{i=1}^k x_i \quad (2.2)$$

donde \vee representa la disyunción lógica.

El objetivo del problema es determinar si existe una combinación de valores de las variables que conviertan en verdadera (sea satisficible) la siguiente fórmula, denominada Fórmula Normal Conjuntiva (*Conjunctive Normal Form*):

$$C_1 \wedge C_2 \wedge \dots \wedge C_m = \bigwedge_1^m C_i \quad (2.3)$$

donde \wedge representa la conjunción lógica.

2.6. El problema de selección de un único proyecto de entre un conjunto de alternativas excluyentes.

Un método clásico de afrontar la selección de un subconjunto de alternativas dentro de un conjunto de proyectos aceptables consiste en plantear un problema de secuenciación de tareas (*Job Shop Scheduling Problem*), partiendo de las siguientes hipótesis:

1. Los proyectos son tareas de mantenimiento sobre instalaciones concretas.
2. Cuando determinados recursos de mantenimiento son asignados a una tarea/instalación no pueden ser reasignados durante el periodo de planificación.
3. Se trabaja con múltiples proyectos en paralelo.
4. Los proyectos se rechazan para un periodo de planificación. En los periodos sucesivos pueden ser aceptados.

El problema del mantenimiento industrial consiste en asignar un proyecto (definido como una tarea que hay que realizar sobre una instalación) para cada recurso disponible, ocu-

pando todos los recursos y realizando todas las tareas aceptadas en la fase anterior por ser necesarias en cada instalación.

2.6.1. Problema de asignación secuencial de tareas.

Según [dHMC04] el problema de asignación secuencial de tareas consiste en la distribución de los recursos entre diferentes actividades que se ejecutan simultáneamente a lo largo del tiempo. Este problema está presente en múltiples áreas de conocimiento, pero en el mantenimiento se trata de un problema fundamental, pues hay que asignar a recursos limitados (equipos humanos de trabajo o maquinas), la realización de las operaciones o tareas necesarias para ejecutar las reparaciones de los sistemas que se quieren mantener. En general, la función objetivo estará relacionada con el tiempo de ejecución de las tareas para minimizar el tiempo total o las esperas.

En producción industrial este problema, del tipo Tiempo Polinomial No Determinista-Difícil (NP-Hard), se plantea de la siguiente manera [Bar12a]:

Sea $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$ el conjunto de todas las tareas.

Sea $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ el conjunto de todas los equipos que deben ejecutar dichas tareas.

Cada trabajo J_i está formado por una conjunto de n_i operaciones $op = \{op_{i1}, op_{i2}, \dots, op_{in_i}\}$ cuya relación de precedencia viene determinada por la secuencia técnica de cada trabajo.

Cada operación op_{ij} debe ser realizado durante p_{ij} unidades de tiempo en un equipo $M_j \in M$.

Consideraciones típicas consisten en suponer $n_i = m, \forall i$ para simplificar las combinaciones y que p_{ij} está establecido de antemano, reduciéndose el problema a determinar el instante de inicio t_i .

Se define el conjunto E_k que contiene las operaciones que deben y pueden ejecutarse en el equipo k sin que exista superposición temporal y se calcula la función objetivo Z , que normalmente será minimizar el tiempo de terminación máximo de la ultima tarea en el sistema $\max C_i$:

$$Z = \min(\max C_i) \quad (2.4)$$

La ordenación de todas las operaciones en los conjuntos E_k da lugar a unas solución del problema JSSP planteado [CSJ].

Incluso con este planteamiento tan simple, este tipo de problemas es uno de los problemas de optimización combinatoria más difíciles de resolver. En el mantenimiento de sistemas industriales, existe una dificultad adicional derivada de la indeterminación de la duración de cada tarea op_{ij} .

Habrá, por tanto que determinar en que conjunto E_k se encaja la tarea op_{ij} en funci3n de la capacidad de dicho conjunto al principio del período de programaci3n para acometer más tareas. Tendremos, por tanto, una serie de restricciones que pueden clasificarse en los siguientes tipos [Bar12a]:

Restricciones de precedencia:

- Habrá operaciones op_{ij} que deberán ser ejecutadas en un orden concreto, es decir, la operaci3n op_{ij_1} deberá estar terminada antes de acometer la operaci3n op_{ij_2}
- La secuencia no tiene por qué ser completa, es decir, algunas operaciones pueden realizarse en cualquier momento pues no tienen dependencia con las otras operaciones, mientras otras estarán sujetas a dependencias.
- Entre las operaciones pueden existir interrupciones o tiempos muertos

Restricciones de recurso:

- Cada equipo solo puede realizar una operaci3n en cada unidad de tiempo.
- Las diferencias entre las dimensiones de tareas y equipos, fuerza a seleccionar un orden para la ejecuci3n de todas las operaciones de cada equipo.
- Seleccionando una de entre todas las permutaciones posibles se obtendrá la soluci3n.

Este tipo de problemas se representa habitualmente en forma de grafo disyuntivo. Un grafo disyuntivo $G = (V, C, D)$ contendrá los siguientes elementos:

- Un conjunto V de nodos con las tareas que es necesario realizar.
- Un conjunto C de aristas de precedencia. Unen nodos que representan operaciones del mismo trabajo.
- Un conjunto D de aristas de recurso. Unen nodos que representan operaciones que se ejecutan en la misma instalaci3n.

El análisis mediante grafos como el presentado en la figura 2.2, permite emplear múltiples algoritmos de resoluci3n estudiados con gran detalle y probados en otros campos. Puesto que los datos empleados para definir las entidades, los trabajos y el dominio se van a organizar en ontologías, que se desarrollarán en el apartado 3.5.3, y estas son estructuras jerárquicas, la creaci3n de grafos a partir de ellas es una operaci3n fácilmente automatizable.

A pesar de que el JSSP est  abundantemente documentado y analizado, en este estudio se están analizando trabajos que se realizan sobre instalaciones distribuidas por la geografía, por lo que se existen otras alternativas mejor adaptadas. Así, también se podrá plantear el problema de asignaci3n secuencial de tareas como un problema de selecci3n de rutas de vehículos (*VRP*)

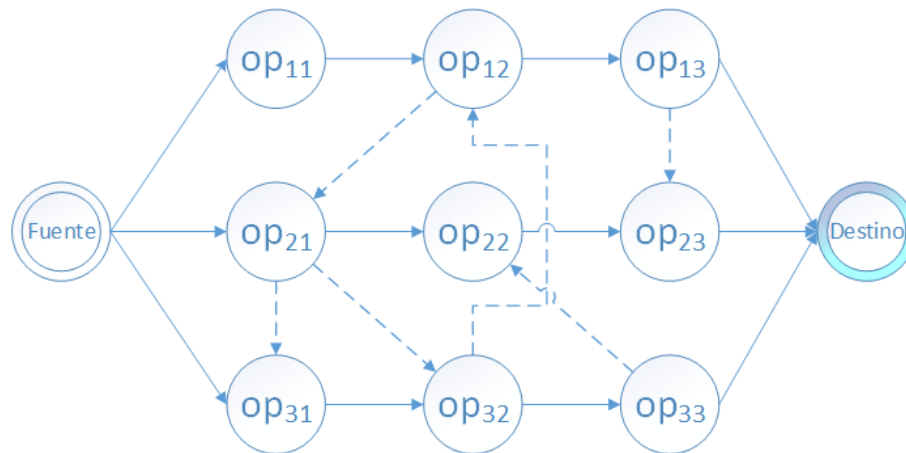


Figura 2.2: Grafo Disyuntivo.

2.6.2. Problema de rutas de vehículos.

El estudio de las rutas de vehículos en empresas logísticas ha sido objeto de múltiples estudios desde que se planteó el problema por primera vez en los años cincuenta [DR59]. El objetivo general consiste en tratar de averiguar las rutas de una flota de transporte para dar servicio a unos clientes. Este tipo de problemas pertenece a los problemas de optimización combinatoria. La función objetivo depende de la tipología y características del problema. Lo más habitual es intentar [Ran88]:

1. minimizar el coste total de operación,
2. minimizar el tiempo total de transporte,
3. minimizar la distancia total recorrida,
4. minimizar el tiempo de espera,
5. maximizar el beneficio,
6. maximizar el servicio al cliente,
7. minimizar el número de vehículos,
8. equilibrar la utilización de los recursos,

La formulación matemática del problema clásico sería:

Sea $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ un conjunto de vértices, donde:

En v_0 está localizado el punto de distribución o base.

Sea $V' = V \setminus \{v_0\}$ un conjunto de n ciudades.

$A = \{(v_i, v_j)\} / v_i, v_j \in V; \quad i \neq j$ es un conjunto de arcos entre vértices.

C es la matriz de costes de desplazamiento o distancias c_{ij} entre los clientes v_i y v_j .

d es el vector de demanda de los clientes.

R_i es la ruta para el vehículo i .

m es el número de vehículos (todos idénticos). Se asigna una ruta a cada vehículo.

Cuando $c_{ij} = c_{ji} \forall (v_i, v_j) \in A$ el problema se denomina simétrico y es habitual reemplazar A con el conjunto de lados $E = \{(v_i, v_j) / v_i, v_j \in V; i < j\}$.

Con cada vértice $v_i \in V'$ está asociada una cantidad de producto q_i que debe ser repartida por cada vehículo. El problema de VRP consiste entonces en determinar el conjunto r de rutas de vehículos con el coste mínimo que tienen el comienzo y el final en la base, de modo que cada vértice de V' se visita exactamente una sola vez por un solo vehículo.

Para facilitar el cálculo, se puede definir $b(V) = \lceil \sum_{v_i \in V} d_i \rceil$ como valor mínimo del número de vehículos necesarios para atender la demanda de todos los clientes del conjunto V .

Vamos a definir un tiempo de servicio δ como el tiempo necesario para descargar todos los productos. Entonces δ_i será el tiempo requerido por un vehículo para descargar en el vertice v_i . Es necesario que la duración total de cualquier ruta del vehículo (viajes más servicios de descarga) no supere un límite determinado de tiempo D .

Una solución posible se compone de:

una partición $\{R_1, \dots, R_m\}$ de V ;

una permutación σ_i de $R_i \cup 0$ especificando el orden de los clientes en la ruta i .

El coste de una ruta determinada ($R_i = v_0, v_1, \dots, v_{m+1}$), donde $v_i \in V$ y $v_0 = v_{m+1} = 0$ (0 denomina al centro de distribución o base), está dada por:

$$C(R_i) = \sum_{i=0}^m c_{i,i+1} + \sum_{i=1}^m \delta_i \quad (2.5)$$

Una ruta R_i es factible si se detiene el vehículo exactamente una vez en cada cliente y la duración total de la ruta no excede del límite especificado de antemano D .

Finalmente, el coste de la solución del problema S es:

$$C_{VRP}(S) = \sum_{i=1}^m C(R_i). \quad (2.6)$$

Para aplicar este problema al mantenimiento habría que asumir:

- El centro de distribución o base v_0 es el centro de trabajo donde se ubica el personal y los recursos
- Los vehículos son equipos de trabajo, con una capacidad limitada.

- Los clientes ubicados en los vértices v_i son las instalaciones sobre las que es necesario realizar trabajos.
- La demanda d_i es la cantidad de trabajo que hay que realizar en la instalación v_i .

Sin embargo, en el mantenimiento de instalaciones distribuidas existen una serie de premisas que marcan diferencias con respecto a este modelo simplificado:

- La demanda d_i de trabajo necesario en una instalación no es una constante. Es decir, la previsión de la demanda antes de iniciar la ruta y la demanda tras realizar la tarea pueden ser diferentes. Estas diferencias pueden ser positivas o negativas, pero siempre afectan a la ruta R_i en cuestión, alterando la planificación de tiempo y los costes finales ⁹.
- Pueden aparecer instalaciones que es necesario visitar cuando inicialmente no estaba previsto ¹⁰.

$$d_i(t_0) = 0 \rightarrow d_i(t_i) \neq 0$$

- Una vez visitada una instalación puede ser necesario volver a visitarla antes de finalizar la ruta para realizar algún tipo de tarea distinta a la principal de la ruta planificada.
- Además de la duración límite D de cada ruta R_i , puede existir un tiempo límite global para realizar todas las rutas D_T . Este tiempo tiene especial relevancia pues será normal que el número de vehículos m sea distinto del mínimo necesario y, por tanto, pueden existir rutas no óptimas para cumplir con este requisito.
- Los equipos de trabajo son diferentes. No todos pueden hacer las mismas funciones. En el caso clásico con vehículos, esto equivaldría a distinta capacidad de transporte, lo que obliga a que determinados vehículos atiendan a clientes con una demanda d_s mayor que la capacidad de otros vehículos.
- Ciertos trabajos sobre las instalaciones tienen que realizarse en períodos concretos de tiempo, debido a restricciones de servicio.

Con estas premisas, el problema VRP se convierte en una variante con múltiples viajes, ventanas de tiempo y viajes de retorno.

2.6.3. Problema de rutas de vehículos con viaje de regreso, múltiples viajes y ventanas de tiempo.

En [O⁺11] se presenta un modelo conceptual para encontrar un conjunto de rutas para vehículos que considera recorridos de ida (*linehauls*) y recorridos de regreso (*backhauls*)

⁹Un trabajo programado de sustitución de un elemento puede complicarse si durante el desensamblado se rompe otro elemento cuya sustitución no estuviese prevista.

¹⁰Averías detectadas durante el periodo de programación.

separados, múltiples viajes y ventanas de tiempo (Problema de rutas de vehículos con retorno, viajes múltiples y ventanas de tiempo (VRPB-MTTW)). La misión de la primera parte de la ruta es atender la demanda de los clientes. Durante la segunda parte, los recorridos de regreso permiten realizar una actividad diferente. De este modo, en el viaje de ida se pueden realizar las entregas de productos mientras que en el viaje de regreso se realizan las retiradas de productos defectuosos objeto de devolución.

Un vehículo realiza varias rutas en cada periodo(*multi-trip*) y vuelve al depósito antes de atender las demás rutas. Esta condición sólo puede ser completamente satisfecha cuando el tiempo de servicio está dentro del horizonte de planificación.

Cada vehículo va a servir a los clientes en una determinada ventana de tiempo que habrá sido establecida en el origen del periodo, así como la demanda de dicho cliente. Esta restricción hace que el vehículo tenga que esperar si ha llegado antes de las ventanas de tiempo. La ventana de tiempo es un intervalo temporal que los clientes proporcionan para aceptar el producto servido.

Habrá que considerar también los tiempos de carga y descarga que representan el tiempo de traslado de las mercancías desde el almacén a los vehículos y viceversa. El tiempo de carga y descarga no excederá el tiempo de servicio inicial y final del tiempo de servicio. Este modelo prioriza a los clientes de la ruta de ida frente a los clientes de regreso.

Las funciones objetivo son minimizar el número de vehículos, minimizar el tiempo total de las rutas, y minimizar el rango de tiempos de las rutas.

La solución se puede hallar lexicográficamente o por orden alfabético. Es decir, la prioridad de la función objetivo se da de forma consecutiva, el primer objetivo tiene mayor prioridad que el segundo y el tercer objetivo. Las variables de decisión son el número de rutas, la secuencia de servicio de los clientes en cada ruta y recorrido, el tiempo de llegada, la marca de tiempo del primer servicio, la marca de tiempo del último servicio, y tiempo de partida para cada cliente. Los parámetros son número de clientes de ida, número de clientes de regreso, demanda de los clientes de ida, demanda de los clientes de regreso, la distancia, velocidad del vehículo, ventana de tiempo y el horizonte de planificación. Hay muchas restricciones en un problema de enrutamiento de este tipo:

1. Cada ruta comienza y termina en el depósito.
2. El horizonte de planificación indica el inicio y el final de la actividad del vehículo.
3. La demanda de entrega y la demanda de recogida son deterministas y conocidas.
4. El vehículo sirve a los clientes de regreso después que a los clientes de ida.
5. Cada cliente sólo puede ser servido una vez por un vehículo.
6. La carga del vehículo no debe superar la capacidad del mismo.

7. El tiempo de servicio sólo puede iniciarse entre la marca de tiempo del primer servicio y la marca de tiempo del último servicio.

Si bien este modelo parece ser el mejor adaptado para representar la actividad de mantenimiento de instalaciones distribuidas, todavía es necesario afinar más el modelo pues:

- Suponiendo que el producto para los clientes de entrega en la ruta de ida sean los trabajos planificados de tipo preventivo y los productos de la ruta de regreso sean los trabajos de tipo correctivo, no planificados, la demanda de estos últimos no será determinista.
- Puede ser necesario que la prioridad de servicio se altere y que se sirva primero a los clientes de regreso.
- Pueden existir excesos de capacidad puntuales que deben ser atendidos.

2.7. El problema de selección de un subconjunto de alternativas dentro de un conjunto de proyectos aceptables.

El (*Secretary Problem*) es, quizás, la versión más estudiada del problema de búsqueda secuencial, en el que la opción "buena" está orientada a hallar el mejor candidato de entre el conjunto de opciones disponibles. El origen del nombre se debe al trabajo [FM60] en el que se estudia un problema de selección de candidatos a un puesto de empleo con el objetivo de encontrar al mejor posible de entre los N disponibles, con el supuesto de que todos ellos se pueden organizar en una sola dimensión de calidad total [BHZ13].

Los candidatos se presentan secuencialmente al entrevistador en un orden aleatorio. El entrevistador no tiene ningún conocimiento sobre la distribución de los valores de calidad de los demandantes. Con cada nuevo solicitante, el entrevistador aprende la calidad (o rango actual en la versión más estricta) de este solicitante, y luego debe elegir entre detener la búsqueda, procediendo a la contratación del actual solicitante, o continuar la búsqueda tratando de encontrar un candidato mejor. Si el entrevistador sigue, no puede volver atrás y elegir un candidato anterior, es decir, no hay ninguna posibilidad de «recuperar» candidatos ya entrevistados en esta búsqueda. Para maximizar las posibilidades de seleccionar el mejor candidato en la configuración del *secretary problem*, el entrevistador debe muestrear un 37% de los solicitantes y luego seleccionar el primer candidato a partir de entonces que es mejor que todos los solicitantes anteriores. Una forma sencilla de hacerlo es establecer un nivel de aspiración igual a la calidad del mejor candidato visto hasta ahora, y después de haber visto al 37% de los candidatos, fijar ese nivel de aspiración y utilizarlo para detener la búsqueda con el siguiente solicitante que supera esa aspiración.

Si bien la aplicación de la regla del 37% es simple, sus derivaciones no lo son. En primer lugar, el enfoque general de muestreo de un cierto número de solicitantes, el establecimien-

to de un nivel de aspiración basado en esa muestra, y luego escoger al siguiente solicitante encontrado que excede el nivel de aspiración fijado. Esto no tiene por qué resultar un procedimiento óptimo. En segundo lugar, tampoco es intuitivo el hecho de que para poblaciones de individuos muy grandes $N \rightarrow \infty$ el tamaño de la muestra (para el ajuste del nivel de aspiración) se aproxima a $\frac{1}{e} \approx 0,368$. Obviamente es poco realista suponer que los humanos se enfrentan a un problema de búsqueda siguiendo esta pauta de muestreo y selección. En este punto los economistas a menudo argumentan que, mientras que los humanos en realidad no llevan cabo cálculos complicados, actúan como si estuvieran haciéndolos.

Matemáticamente el problema se describe por dos números (r, s) , donde r es el número de elementos hasta ahora presentado y s es el rango aparente del r_{th} elemento presentado.

Si $s \neq 1$ obviamente no es el mejor y no debería ser aceptado. Después de analizar otro elemento, el nuevo estado del proceso será $(r + 1, s')$, donde s' tiene la misma probabilidad de ser cualquiera de estos valores: $1, 2, \dots, r + 1$. Si $s = 1$ este elemento sería aceptable.

La probabilidad de que el elemento t_{th} sea el mejor de todos los disponibles se puede calcular simplemente como: r/n .

Siendo $V(r, s)$ la probabilidad máxima esperada de la elección del mejor elemento, cuando el estado del proceso es (r, s) , el principio de programación dinámica produce las ecuaciones [Fre83]:

$$V(r, 1) = \max \frac{r}{n}, \frac{1}{r+1} \sum_{s'=1}^{r+1} V(r+1, s') \quad (2.7)$$

$$V(r, s) = \frac{1}{r+a} \sum_{s'=1}^{r+1} V(r+1, s') \quad (s = 2, 3, \dots, r) \quad (2.8)$$

con $V(n, s) = 1$ si $s = 1$ y $s = 0$ en caso contrario.

Capítulo 3

Descripción de las alternativas

3.1. Introducción

Los sistemas reales no están aislados. Se encuentran imbricados con su entorno. Este entorno es una de las principales dificultades que se le presentan al decisor, pues no es controlable e, incluso, es difícilmente precisable. La definición de entorno no es sencilla. Según el diccionario de la RAE en su primera acepción sería *"ambiente, lo que rodea"*. La segunda acepción hace referencia al mundo informático y es un poco más precisa: *"conjunto de condiciones extrínsecas que necesita un sistema informático para funcionar, como el tipo de programación, de proceso, las características de las máquinas que lo componen, etc"*.

En [HL09a] se hace un interesante repaso de distintas interpretaciones de esta segunda acepción propuestas por diversos autores frecuentemente referenciados en el campo de la computación y la inteligencia artificial. En este campo, factores como la ubicación, la identidad de personas y objetos, los cambios y el tiempo son fundamentales. Sin embargo, la amplitud de estos conceptos unida a la complejidad y ambigüedad inherentes a los mismos, obligan a implementar modelos para tratar de representar la realidad para su uso como fuente de información. La similitud entre la naturaleza de un sistema informático y un sistema de ayuda a la decisión nos permite utilizar las mismas definiciones.

Cuando nos enfrentamos al análisis del entorno de una actividad, la calidad de la información es el mayor problema. En el momento actual resulta casi imposible modelar de forma exhaustiva variables como pueden ser las preferencias del decisor, información espacial y geográfica, información temporal, cultura, situación social, recursos y su disponibilidad, actividad, calendario, etc. Para alguna de estas variables existen representaciones más o menos precisas basadas en modelos estadísticos; sin embargo, los resultados aportados por este tipo de modelo sobre efectos de influencia mutua no son satisfactorios.

Una de las ramas de investigación que está llevando a cabo mayores avances para modelar estos factores es la inteligencia artificial, donde uno de los objetivos primordiales es

conseguir un razonamiento equiparable al del ser humano. En [HL09a] se recogen varios requisitos que deben cumplirse en un modelo de contexto ubicuo.

- Generalidad: para permitir su uso en la mayor cantidad posible de tareas y servicios. Tal como se ha expuesto una de las principales características del mantenimiento es la diversidad de actividades.
- Composición distribuida, para soportar los sistemas distribuidos, muy habituales en los sistemas reales que hay que mantener.
- Validación parcial: dada la complejidad de la mayoría de los sistemas en los que se centra este estudio, resulta muy útil poder descomponer cada parte en otras más pequeñas.
- Calidad de la información: incluso cuando se puede medir un parámetro, los captadores de información pueden proporcionarla con distinta precisión.
- Superficialidad y ambigüedad: muy a menudo los datos que proporcionan información sobre parámetros del entorno son incompletos, ambiguos o ambas cosas a la vez.
- Nivel de formalidad.
- Aplicabilidad a entornos existentes.
- Desarrollo evolutivo: los grandes sistemas evolucionan a lo largo del tiempo debido a múltiples factores: cambios de tecnología, nuevas situaciones, . . . Cualquier modelo que se implanta para emular estos sistemas deberá estar preparado para adaptarse a los mismos.
- Interoperabilidad.
- Razonamiento e inferencia. Si bien en muchas ocasiones las tareas de mantenimiento se componen de elementos repetitivos que pueden ser adecuadamente entrenados, otras muchas ocasiones se producen situaciones completamente nuevas, por su origen o por las circunstancias. En estas situaciones, el cerebro humano aplica reglas de similitud basadas en el aprendizaje para encontrar una solución.

En los sistemas complejos, con gran número de subsistemas y elementos, es necesario manejar un gran volumen de datos simplemente para describirlos. Representar el estado también requiere gran cantidad de datos [Dub98]. Por tanto, en la tarea de buscar un modelo que sirva de ayuda en la toma de decisiones a los gestores de mantenimiento, uno de los objetivos básicos será una baja complejidad de cálculo, pues en caso contrario el modelo resultante sería inservible al no presentar los datos a tiempo. Desde el estudio de Miller [Mil56] en 1956 acerca de las limitaciones del cerebro humano para procesar todos los componentes de información disponibles en un problema complejo, muchos han sido los estudios que se han realizado sobre el tema, pasando por Simon [Sim82], hasta llegar a [Cow01], que se atreve a ir mucho más allá para demostrar que incluso siete

variables pueden resultar difíciles de procesar en la mayoría de las ocasiones. Trasladando estas conclusiones sobre el comportamiento del cerebro humano al campo de la toma de decisiones por parte de los expertos, es fácil entender que, casi siempre, las soluciones de los problemas se obtienen tras la reducción de todas las variables presentes en el momento en que se tiene que tomar la decisión a unas pocas que pueden ser procesadas en base a conceptos fijados por la experiencia que son memorizados a largo plazo.

3.2. El mantenimiento como selección de proyectos.

En el capítulo 2 hemos expuesto los problemas de decisión a los que se enfrenta un responsable de mantenimiento a la hora de organizar los trabajos. Así como diferentes enfoques matemáticos que le pueden ayudar en el problema. La mayoría de estos modelos son deterministas, es decir, la evolución futura de los fenómenos está determinada por las condiciones iniciales. Los sistemas complejos reales rara vez son deterministas. El carácter evolutivo de los mismos hace que cada pequeña mutación (cambio en las condiciones de cualquier elemento del sistema), provoque evoluciones de resultado difícil de prever. Puesto que uno de los objetivos más importante del mantenimiento es tratar de mantener el sistema sano, cada vez que se detecta un fallo será necesario seleccionar entre diversas alternativas para restaurar el sistema a dicho estado. El responsable de mantenimiento debe considerar que la tasa de fallo observada y la percepción de la gravedad de los efectos. Esta percepción va a tener un peso considerable sobre la decisión que tiene que tomar. Al mismo tiempo, debe valorar la afección que para el resto de las tareas puede suponer la incorporación de la nueva, en forma de costes directos o indirectos o en forma de incremento del periodo de realización o finalización. Con estos datos el responsable de mantenimiento debe tomar una decisión que dé respuesta a la siguiente pregunta:

¿Cómo acometo esta tarea de manera que el resto de mis objetivos no se vea afectado?

(Que es una versión resumida de las preguntas que está Tesis pretende responder:

- ¿Qué variables debo tener en cuenta al analizar este problema?
- ¿Es necesario realizar acciones de mantenimiento para resolver este problema?
- ¿Cuándo será el mejor momento para realizarla?
- ¿Quién y con qué medios la podrá ejecutar?)

Mientras se buscan las respuestas a estas cuestiones, es preciso recordar que ya existirán tareas cuyo curso debe continuar para cumplir con todos los objetivos del mantenimiento de sistemas. Considerando el problema detectado como un proyecto, según la metodología de toma de decisión habría que intentar encuadrarlo dentro de las siguientes opciones posibles [Cas96]:

- Aceptación o no del proyecto considerado individualmente.

- Selección de un único proyecto de entre un conjunto de alternativas excluyentes.
- Selección de un subconjunto de alternativas dentro de un conjunto de proyectos aceptables debido a la existencia de restricciones activas en los recursos disponibles para acometer varios proyectos.

En el planteamiento del problema, partimos de la hipótesis de unos pocos objetivos globales, como son asegurar el correcto funcionamiento del sistema y mejorar los procesos productivos. Sin embargo, puesto que la red es muy extensa, este objetivo se consigue por agregación de múltiples objetivos parciales cuya consecución garantiza el éxito del conjunto. Por tanto, el problema debería ser abordado desde la óptica de la programación multiobjetivo.

Se acepta normalmente en la práctica de la ingeniería que tareas de mantenimiento supuestamente idénticas, realizadas bajo similares condiciones, requieren diferentes lapsos de tiempo [Kne96b]. Las razones principales para estas variaciones se pueden clasificar en tres grupos:

1. Factores personales: que representan la influencia de la habilidad, motivación, experiencia, actitud, capacidad física, vista, autodisciplina, formación, responsabilidad y otras características similares relacionadas con el personal implicado;
2. Factores condicionales: que representan la influencia del entorno operativo y las consecuencias que ha producido el fallo en la condición física, forma, geometría y características similares del elemento o sistema sometido a mantenimiento;
3. Factores de entorno: que reflejan la influencia de aspectos como temperatura, humedad, ruido, iluminación, vibración, momento del día, época del año, viento, etc. en el personal de mantenimiento durante la ejecución de la tarea de mantenimiento.

Consecuentemente, la única forma de evaluar el impacto de estos factores, y de otros que pueden concurrir, sobre la duración de las tareas de mantenimiento, es usar la teoría de probabilidades como base para la descripción cuantitativa de dicha duración.

3.3. Modelado de sistemas.

En trabajos como los de [Sim77] y [Iwa88a] se establecen las bases que permiten hacer una selección de las variables en función de su influencia en el sistema. Un conjunto de ecuaciones simultáneas describe el comportamiento de un sistema físico en términos de funciones relacionales. Relaciones funcionales con la misma expresión matemática pueden tener significados físicos completamente diferentes. Las declaraciones causales son asimétricas, es decir, si se conmuta la expresión el significado cambia. Este aspecto es muy importante en la descripción de los sistemas físicos, pues las expresiones matemáticas por sí solas carecen de sentido.

3.3.1. Las relaciones causales.

La relación causal es unidireccional: causa \rightarrow efecto, mientras que la relación funcional es bidireccional. El conocimiento de la dependencia causal entre las variables es esencial en multitud de problemas prácticos como diagnosis y predicción. Una vez modelado un sistema por un conjunto de ecuaciones, si se observa una variable con valores anormales no siempre es trivial detectar cuáles son las variables y las ecuaciones que provocan esos valores, cuáles podrían resultar afectadas, y qué otras observaciones son sólo espúreamente relacionadas con la situación inicial. Esto es todavía más evidente cuando el número de ecuaciones y variables es muy grande, como ocurre en los sistemas complejos reales.

Los principios físicos en general están expresados en términos de relaciones matemáticas. La sabiduría de un experto se usa para razonar sobre la situación y generar explicaciones causales a partir de un conocimiento acerca de los principios físicos generales y de su capacidad para reconocer la aplicabilidad de los principios en una situación dada. Las personas son capaces de explicar el comportamiento en términos causales, incluso cuando la situación está representada formalmente en un lengua no causal. La identificación de las circunstancias que rodean un fenómeno, el contexto, permite a las personas decidir sobre la dirección de la causalidad, incluso cuando los fenómenos son descritos por un conjunto de relaciones funcionales no causales. La teoría de la ordenación causal proporciona una técnica para inferir las relaciones causales entre las variables en un conjunto de relaciones funcionales.

La definición formal de las relaciones causales dadas por la teoría es útil en la generación de una interpretación causal del comportamiento de cualquier sistema descrito por un sistema de ecuaciones simultáneas, incluyendo los dispositivos físicos.

Con el fin de aplicar el método de ordenamiento causal para determinar la estructura causal en un modelo, cada ecuación del mismo debe ser una ecuación estructural que represente un mecanismo conceptualmente distinto en el sistema. Describir un sistema en términos de los mecanismos que determinan los valores de las variables es fundamental para el análisis causal. Aunque hay muchas ecuaciones correctas que se pueden escribir acerca de una situación dada, muchas de ellas no son estructurales. Cualquier teoría que intenta inferir relaciones causales en un modelo debe abordar la cuestión de la construcción de un modelo correcto que soporte cualquier relación de nuestra percepción de los fenómenos con el mundo real que se está modelando.

Cuando el sistema está compuesto de muchos elementos, con multitud de variables y relaciones, se vuelve demasiado complejo para ser comprendido fácilmente en su totalidad. Entonces, es necesario agregar el modelo, simplificándolo, para generar un modelo más abstracto que implique un menor número de variables y relaciones, de forma que sea más sencillo razonar sobre el. Esta agregación la hacen las personas naturalmente, sin embargo, en el modelo se realiza mediante la agrupación de las variables y las relaciones

en subsistemas, de tal modo que se pase a describir todo el sistema en términos de estos subsistemas y sus interacciones pero siempre manteniendo las relaciones causales de las variables tanto para el sistema como para los subsistemas.

Definición de Ordenamiento Causal.

La idea de ordenamiento causal en un sistema de ecuaciones se puede describir aproximadamente como sigue:

Un sistema de n ecuaciones se llama independiente o completo si tiene exactamente n incógnitas.

Dado un sistema independiente S , si s es un subconjunto propio de S , independiente y que no contiene ningún otro subconjunto independiente, s se denomina subconjunto completo mínimo.

Sea S_0 la unión de todos estos subconjuntos mínimos completos de S ; entonces S_0 se denomina conjunto de subconjuntos mínimos completos de orden cero.

Estructura independiente o completa.

Una estructura en equilibrio es independiente o completa si tiene exactamente el mismo número de ecuaciones que de variables

Estructura en equilibrio.

Una estructura en equilibrio es un sistema de ecuaciones de equilibrio que cumple las siguientes propiedades:

- En cualquier subconjunto de k ecuaciones tomadas de la estructura aparecen al menos k variables con coeficientes distintos de cero en al menos una ecuación de dicho subconjunto.
- En cualquier subconjunto de k ecuaciones en las que aparecen $m > k$ variables con coeficientes distintos de cero, si los valores de las variables $(m - k)$ se eligen arbitrariamente, entonces solo existe una única solución para las k variables restantes.

Ecuaciones de modelado.

Las ecuaciones que modelan un sistema parten del conocimiento de sus mecanismos. El término mecanismo tiene un sentido amplio referido a distintos elementos conceptuales que realizan una función que permite explicar el funcionamiento del sistema completo. Los mecanismos pueden ser de dos tipos:

1. leyes que describen procesos físicos, o
2. componentes locales que operan de acuerdo a leyes conocidas.

Las leyes físicas habitualmente se expresan en forma de sistemas de ecuaciones diferenciales. En este tipo de sistemas existe una relación asimétrica entre las derivadas, que fijan los valores para el próximo intervalo de tiempo, y las variables de las ecuaciones, que determinan las derivadas. Una vez que se ha elegido una descripción estructural de un sistema, se ha establecido implícitamente una atribución formal de las relaciones causales entre las variables que debe encajar con nuestra noción intuitiva de causalidad. Las ecuaciones que describen cada mecanismo se denominan ecuaciones estructurales en la literatura económica.

Cada ecuación de una estructura debe construirse analizando qué variables influyen en otras variables para cada mecanismo. Los mecanismos individuales son partes conceptuales del sistema total que pueden o no estar físicamente separadas. Para cada mecanismo habrá una ecuación en la estructura. Esta descripción del sistema a través de mecanismos que determinan los valores de las variables individuales es fundamental para el análisis causal. Si un componente es sustituido o comienza a funcionar de manera defectuosa, o si se altera el comportamiento del mismo para seguir una ley física distinta, entonces la ecuación estructural debe modificarse para reflejar el cambio del mecanismo. Una ecuación matemática por sí misma solo expresa una relación funcional simétrica entre variables. No permite establecer una referencia directa para entender la asimetría de la relación causal.

Variables endógenas y exógenas:

La asimetría debe introducirse determinando qué variables se consideraran exógenas. Sea D un subconjunto completo de orden k . Sea x_i una variable que aparece en D .

Si x_i pertenece a un subconjunto no completo de orden menor que k , entonces x_i es una variable endógena del subconjunto D . Si x_i pertenece a un subconjunto completo de orden menor que k , entonces x_i es exógena respecto a D .

Considerar una variable como exógena significa excluir del sistema en estudio cualquier mecanismo que controle el valor de dicha variable. El análisis del ordenamiento causal depende tanto de las variables exógenas seleccionadas como de las ecuaciones elegidas. En este trabajo asumiremos que una variable es exógena para el sistema o subsistema en estudio si el sistema o subsistema no tiene influencia en la determinación de los valores de dicha variable. La influencia de las variables exógenas puede ser estudiado manipulando o controlando experimentalmente sus valores. Esto es más sencillo en sistemas de pequeño tamaño o concentrados geográficamente. El valor de una variable exógena se habrá fijado en un instante temporal muy anterior a los valores de las variables del sistema en los que estamos interesados. En una primera aproximación, las variables independientes exógenas

serán las determinadas únicamente por factores externos al contexto local del sistema en estudio. La única restricción en el uso de conocimiento global, debería consistir en aplicar exclusivamente aquel que explica, explícita o implícitamente, el funcionamiento del componente en particular que se está analizando.

Importancia de los mecanismos conceptuales.

Describir un sistema en términos de sus mecanismos conceptuales es fundamental para el análisis causal. Cada ecuación de un modelo corresponde a una forma de entender la operación conceptual de un mecanismo que opera en la situación modelada. Este requisito es esencial para emplear la técnica de ordenamiento causal, pues una errónea elección de las ecuaciones puede conducir a una estructura causal que no sirve para explicar el funcionamiento del sistema en la situación estudiada. En general, para cualquier sistema físico, el número de ecuaciones que se pueden escribir para describirlo, exceden sobradamente el número de variables que lo definen. Para producir una estructura causal correcta, es muy importante seleccionar, de entre todas las posibles, solo aquellas que reflejan el entendimiento del funcionamiento del mecanismo para la situación estudiada.

Garantizar que un modelo incluye todas las ecuaciones estructurales que definen el sistema es una cuestión muy importante. Puesto que las ecuaciones estructurales provienen de la comprensión de los mecanismos, es posible construir un modelo que representa el comportamiento de los mecanismos de forma explícita, y, además, se puede generar sistemáticamente ecuaciones estructurales a partir de dicha representación. Esto es posible mediante la representación de procesos mediante redes.

3.3.2. Representación de sistemas mediante redes.

Las redes gráficas permiten representar de forma explícita la comprensión de los mecanismos subyacentes de un modelo de ecuaciones. Una red de proceso es una representación semántica de los procesos que tienen lugar en un dispositivo. Intuitivamente se pueden describir los procesos como aquellos fenómenos que ocurren en un determinado momento definiendo el comportamiento global del sistema.

En todo sistema físico, las leyes generales controlan los flujos de materia y energía que regulan el comportamiento total de cada dispositivo del sistema. Estas leyes explican las relaciones de conexión entre las entradas y las salidas de dichos flujos. En el caso particular del mantenimiento de sistemas, por complejos o sencillos que sean, habrá que tener en cuenta estos flujos, si bien, las energías que habrá que considerar serán sólo aquellas que modifican el estado de los dispositivos. En general, un proceso se modela como un flujo de materiales o de energía:

1. Puede ser simple, si lo caracteriza un único flujo

2. O compuesto si está formado por varios procesos relacionados. Es decir, para un proceso son necesarios componentes que se producen en un proceso anterior.

Los nodos de un proceso se conectan para formar la red por medio de conectores que definen el tipo de relación entre ellos. El propósito de construir una red que modele un proceso es conseguir una representación explícita del mismo que permita entender el comportamiento, tanto del sistema como de sus componentes, facilitando un método sistemático para construir el modelo de ecuaciones estructurales. Las ecuaciones expresan aspectos del comportamiento global del sistema en función de las variables que intervienen en el mismo. Las variables representan atributos de cada entidad que compone el sistema, ya sean dispositivos, materiales o procesos.

3.3.3. Caracterización de las variables.

Las variables pueden ser cuantitativas o cualitativas:

- Cuando se puede medir una variable, ya sea directa o indirectamente, y expresar el comportamiento de un elemento, subsistema o sistema, en función de dicho valor, estamos ante una variable cuantitativa.
- Por el contrario, cuando los efectos de una variable no pueden ser medidos, pero el comportamiento del sistema o elemento está afectado por ella, la variable será cualitativa.

Una vez creada la red del proceso, las variables relevantes de cada nodo se pueden generar automáticamente. Esto se hace a partir de una base de conocimiento que recoja las variables y las leyes generales que rigen el comportamiento de cada tipo de nodo. Las ontologías definidas más adelante, en el apartado 3.5.3, contendrán este conocimiento.

La eficiencia de un sistema se mide utilizando una variable que relacione las entradas y las salidas. Cuando en un sistema interactúan procesos independientes, existe una relación entre ellos que no resulta trivial encontrar y explicar. Los procesos independientes pueden existir de forma autónoma, pero cuando confluyen en un sistema global, su eficiencia estará condicionada por la presencia de los otros procesos. La suma de las salidas de cada proceso no tiene por qué producir un resultado aritmético. Puede ser mayor o menor. Obtenidas las variables, se puede construir el sistema de ecuaciones que modela el comportamiento del sistema.

- Ecuaciones de balance de energía en cada nodo de tipo material.
- Ecuaciones de flujo de materia y energía entre nodos.
- Ecuaciones características que describen rasgos o pautas de comportamiento de diferentes tipos de materiales, procesos o subsistemas.

- Ecuaciones de variables exógenas que indican el efecto de las variables que son controladas externamente.

Las ecuaciones de variables exógenas indican qué variables deben ser consideradas exógenas. Habrá una ecuación por cada variable exógena que tomarán la forma de una constante: $v = c$ donde v es la variable y c es una constante.

Determinar las variables exógenas es una parte importante del proceso de construcción del modelo. Cuando un componente (dispositivo, subsistema o sistema) se analiza formando parte de un sistema mayor, es posible determinar las variables exógenas de ese componente tomando como base el conocimiento de las variables controladas por otros componentes y las relaciones de conectividad entre ellas.

Una estructura dinámica independiente o completa es un conjunto de n ecuaciones diferenciales de primer orden con n variables tales que:

- En cualquier subconjunto de k funciones de la estructura, existe, al menos, la primera derivada de k variables.
- En cualquier subconjunto de k funciones donde existe la primera derivada de r ($r \geq k$), si los valores de las primeras derivadas de cualquier $(r - k)$ se eligen arbitrariamente, las k funciones restantes quedan determinadas unívocamente como función de n variables.

Una variable de un sistema dinámico es exógena si su derivada no depende de ninguna otra variable del sistema. Esto incluye casos donde la derivada sólo depende de factores externos y también casos donde la derivada es una función de sí misma pero no de otras variables.

Si x_i es una variable exógena, la i -ésima ecuación de la estructura dinámica en forma canónica responde a los siguientes casos:

- Caso 1: La derivada es función de sí misma $x_i = f(x_i)$
- Caso 2: La derivada sólo depende de factores externos: $x_i = c_i$

La exogeneidad significa que una variable no está influenciada por ninguna otra del sistema. En todo sistema hay variables cuya respuesta a los cambios en otras variables es muy rápida, adaptando su valor para buscar un nuevo punto de equilibrio. En cambio, existen otras variables cuya respuesta a los cambios es tan lenta que puede considerarse que es independiente de los valores del resto de variables. La ecuación correspondiente a una variable de este tipo puede ser sustituida por una ecuación de variable exógena, que permite analizar el sistema sin tener en cuenta el mecanismo real que conecta las variables, pues su lenta variación lo hace insensible al sistema observado. Esta operación se puede realizar de dos maneras:

1. Si una variable x_i está cambiando, pero la tasa de cambio depende mayoritariamente de sí misma y muy poco de otras variables, entonces se pueden eliminar esas otras variables de la expresión en el lado derecho de la ecuación diferencial para que sea una función sólo de x_i .
2. Si una variable w_i está afectada por múltiples variables, pero su tasa de cambio es muy pequeña, la ecuación dinámica puede ser sustituida por una ecuación donde la variable sea una constante.

Considerar una variable como exógena equivale a eliminar el mecanismo que regula dicha variable del sistema bajo consideración. Esto es razonable cuando la realimentación que recibe una variable del resto de variables del sistema es insignificante. Es importante analizar con detenimiento los valores que pueden considerarse como insignificantes, pues una mala elección puede conducir a resultados no deseados.

Estos análisis son de gran relevancia, pues permiten estudiar el sistema de una forma más sencilla si se encuentra una manera de descomponer el sistema complejo en sistemas más simples que expliquen el funcionamiento global mediante un mecanismo de agregación. Así, si las variables de un sistema dinámico grande se pueden dividir en subconjuntos tales que las variables en cada subconjunto estén más fuertemente conectadas entre sí que a las variables de otros subgrupos, es posible describir el comportamiento a corto plazo de cada subsistema independientemente de lo que ocurre en los otros subsistemas. La agregación en sistemas dinámicos es más que una técnica de abstracción numérica, ya que el mismo principio permite justificar la abstracción de modelos incluso en los casos en que sólo se dispone de información cualitativa.

3.3.4. Modelado matemático de sistemas.

Tal como se expone en [Lay76a], cualquiera que sea el sistema considerado, ningún análisis cuantitativo es factible hasta que las diferentes interrelaciones existentes de las magnitudes del sistema, entre sí y con las entradas externas, se hayan expresado en términos matemáticos. Esta afirmación se puede generalizar también para los análisis cualitativos.

En todo sistema real, el modelado matemático conduce a un compromiso entre la precisión de la representación y la complejidad de cálculo. En primera instancia, se tiende a asumir simplificaciones de la realidad física con el fin de asegurar una formulación matemática más sencilla. En etapas posteriores, una vez analizado el comportamiento por comparación con el modelo sencillo, puede ser necesario desarrollar modelos más precisos. En cualquier caso, es necesario conocer las limitaciones de cada modelo para no perder de vista el comportamiento del sistema real.

Representación de sistemas.

Consideramos un sistema definido por n magnitudes: $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ cuyas interrelaciones se rigen por leyes físicas representadas por ecuaciones diferenciales de primer grado. Para este sistema existirán m entradas externas: $u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)$ aplicadas en varios puntos del mismo e influyendo sobre su comportamiento.

Las salidas del sistema se denotan como $v_1(t), v_2(t), \dots, v_p(t)$.

Puesto que el sistema está descompuesto hasta donde es posible, el número de entradas m nunca podrá ser mayor que el número de magnitudes n : $m \leq n$. Dado que las magnitudes del sistema contribuyen a las salidas, e incluso alguna de ellas puede ser considerada directamente una salida también, se cumplirá: $p \leq n$.

Las interrelaciones entre las magnitudes x_i y las entradas u_j se pueden escribir de la forma:

$$\frac{dx}{dt} \equiv \dot{x}_r = f_r(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_m; t) \quad (3.1)$$

siendo $r = 1, 2, \dots, n$ donde f_r representa funciones, que pueden no ser lineales, de varios argumentos.

Estas ecuaciones pueden ser escritas de forma más concisa como ecuaciones de matrices:

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (3.2)$$

donde:

$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ se denomina *vector columna de estado*,

$u = [u_1, u_2, \dots, u_m]$ se denomina *vector columna de entrada*.

Esta ecuación es la forma canónica (o estándar) de la ecuación de estado para un sistema no lineal y no independiente.

Si suponemos que las salidas no son más que un subconjunto de las magnitudes de estado, entonces la ecuación de salida asume la forma sencilla:

$$v = Cx \quad (3.3)$$

donde $v = [v_1, v_2, \dots, v_m]$ es el vector (columna) de salida,

y C es una matriz de orden $p \times n$,

de tal manera que cada fila contiene un único elemento unidad mientras que el resto de los valores son cero.

La inmensa mayoría de las ecuaciones diferenciales no lineales no son resolubles analíticamente, por lo que en caso de existir una f_r no lineal entre los elementos de x es necesario recurrir a métodos de cálculo iterativos paso a paso.

3.4. Métodos de identificación de variables.

Se analizan los trabajos de [Mer98] y [SA05] para seleccionar los métodos más adaptados en la determinación de las variables que influyen en la selección de proyectos, considerando los trabajos de mantenimiento como proyectos.

3.4.1. Investigación Racionalista.

Una característica importante de la investigación racionalista consiste en considerar que el fenómeno en estudio existe tal cual. Es decir, que la misma debe abstraerse del entorno de la investigación, las creencias y los supuestos del investigador, que además puede estudiar, manipular y controlar a voluntad las relaciones entre variables y las observaciones de dichos efectos.

Otra característica significativa de la investigación racionalista se refiere a que el objetivo de la misma es determinar las distribuciones de un conjunto de variables predefinidas en la población o la verificación de un conjunto de relaciones también preestablecidas.

Entre las mayores ventajas de este enfoque cabe destacar la precisión que puede alcanzar en las mediciones para cada variable, ofreciendo una gran capacidad de prueba y fiabilidad, pues los resultados pueden ser corroborados por otros investigadores. Otra de las ventajas más importantes radica en ser un método bien conocido y aceptado por la comunidad científica.

Sin embargo, entre los inconvenientes de este método, hay que señalar que, debido a que los datos se recogen fuera de contexto, no pueden explicar variaciones, quizás cruciales, relacionadas con el propio contexto, lo que se traduciría en que resultados obtenidos aplicando rigurosamente este método serían siempre confiables pero no siempre relevantes (en otras palabras, los resultados podrían no tener importancia).

3.4.2. Método del caso.

Un estudio del caso utiliza típicamente múltiples métodos y herramientas para la recopilación de datos por un observador directo a partir de una serie de entidades, en un único entorno natural. En ese entorno se consideran aspectos temporales y contextuales del fenómeno en estudio, pero no existen controles experimentales o manipulaciones. Los métodos y las herramientas empleadas incluyen enfoques cuantitativos y cualitativos,

así como métodos intrusivos y no intrusivos¹. El objetivo es entender, de la manera más completa posible, el fenómeno que se estudia a través de triangulación perceptual, [Dav01], consistente en la acumulación de múltiples entidades de apoyo utilizadas como fuentes de ensayo para asegurar que los hechos que se recogen son correctos.

Un punto sutil pero importante aquí, es que el entendimiento sólo será conocimiento dentro de los confines del marco de percepción de alguien, por lo general, el investigador. Es decir, la comprensión que se logra sólo tiene sentido en el marco de supuestos, creencias y puntos de vista expresados por el investigador, por lo general basados en su propia experiencia.

Entre la ventajas más importantes de este método cabe destacar:

- El fenómeno puede ser estudiado en su entorno natural con todos los parámetros significativos presentes, de modo que el conocimiento es adquirido mediante la observación del estado real, lo que confiere gran relevancia a las propuestas teóricas.
- El método del caso permite la pregunta mucho más significativa de por qué, en lugar de sólo qué y cómo, pues permite comprender mejor la naturaleza y complejidad del fenómeno al analizarlo como un todo.
- Este método se presta especialmente en investigaciones innovadoras y exploratorias donde las variables son aún desconocidas y el fenómeno no está bien comprendido.

Por contra, entre sus inconvenientes, podemos citar:

- Se requiere observación directa sobre el caso real, lo que genera a) costes, b) tiempo, c) dificultades de acceso, d) la necesidad de múltiples métodos y herramientas, e) falta de controles, f) las complicaciones del contexto, g) y la dinámica temporal.
- Falta de familiaridad con sus procedimientos para otros investigadores; para muchos la investigación cualitativa, en general, se percibe como si tuviera tendencia a errores de construcción, mala validación y cuestionable generalización.

A pesar de esos inconvenientes, el método del caso cumple con las reglas del rigor científico:

- Observaciones controladas. Se observan fenómenos naturales en su propio entorno. Son observaciones del mismo tipo que las utilizadas en medicina y antropología.
- Deducciones controladas. La aplicación de las reglas de la lógica formal a proposiciones verbales, palabras y sentencias permite obtener teorías válidas sin utilizar ningún número (aunque a veces puede ser necesario en aras de una mayor precisión). Sin embargo, la deducción lógica no requiere del uso de las matemáticas en el caso más general.

¹Se pueden usar datos financieros, entrevistas, memorandos, planes de negocio, organigramas, herramientas y otros elementos físicos, así como observaciones sobre las acciones e interacciones de la dirección o empleados.

- Resultados replicables. Debido a que casi nunca se pueden duplicar exactamente las mismas condiciones en otra situación, la replicabilidad se logra mediante la aplicación de la teoría obtenida del caso concreto a otro caso con condiciones ligeramente diferentes, que podrían conducir a otra predicción. Incluso en el caso de que la predicción fuese distinta, es posible corroborar la teoría mediante este sistema.
- Resultados generalizables. Para poder generalizar los resultados de un estudio de investigación hay tres métodos principales:
 - Incluir tantas variables independientes como sea posible, de modo que cualquier situación que incluya los mismos factores podrá ser incluida en la teoría. Es deseable que la inclusión de variables adicionales no requiera mayor complejidad en la teoría que se está desarrollando, ya que la simplicidad teórica es siempre una característica deseable de cualquier investigación.
 - Incluir múltiples poblaciones en el estudio original para desarrollar una teoría con mayor comprensión del fenómeno estudiado. Esta situación es habitual cuando se analizan dos sectores de actividad diferentes respecto a un mismo fenómeno y se sospecha que el sector es irrelevante para ese fenómeno.
 - Probar la teoría original en poblaciones alternativas.

La generalización es un proceso inductivo más amplio que la simple proyección estadística de los resultados obtenidos para una muestra de la población y, por lo tanto, no hay ningún inconveniente en aplicarla a resultados cualitativos. En este sentido, un caso único estudiado a fondo hasta su comprensión, puede ser tanto o más ilustrativo para establecer una teoría perfectamente generalizable como un conjunto amplio de casos estudiados someramente sobre los que se aplican leyes estadísticas para inferir la misma comprensión del fenómeno.

3.4.3. Selección del método.

El método del caso parece el más adecuado para acometer el estudio de sistemas distribuidos de gran tamaño debido:

1. A la forma de obtener información, consistente en controles naturales. Estos controles se determinan en la fase de diseño del estudio. Este tipo de controles han sido aplicados durante siglos por científicos reputados como son los astrónomos y geólogos. Garantizan el rigor científico pues están claramente definidas.
2. Es posible observar directamente el sistema en su estado natural. Sobre dichas observaciones se emplea la lógica como herramienta para inferir las relaciones entre las variables en lugar de métodos estadísticos aplicados sobre una muestra de la población. Las colecciones de datos, observaciones, triangulación y reglas lógicas permiten

conseguir deducciones e inferencias con el mismo valor científico que la aplicación de métodos matemáticos y estadísticos.

3. Puesto que los parámetros están impuestos por el entorno, este método se centra en identificar las variables, estimar su variabilidad, su influencia en el proceso y en comprender el funcionamiento y las interrelaciones.

Por todo lo expuesto, nos centraremos en dicho método como eje central de la determinación de las variables.

3.5. Representacion del conocimiento de las variables.

En todo sistema físico complejo intervienen múltiples elementos. La dificultad para seleccionar las variables que caracterizan completamente el sistema y su comportamiento, tanto interno como en su interacción con el entorno, está ligada al principio de la complejidad y la creciente variedad de componentes, equipos, máquinas, procesos que requieren un conocimiento significativo de las leyes que los gobiernan.

Otra dificultad importante viene impuesta por la falta de disponibilidad de técnicos experimentados, expertos de dominio, que conozcan en detalle cada proceso u operación que ocurre dentro del sistema.

Cuando se produce un fallo que no se resuelve en el tiempo previsto, puede llegar a causar la inactividad del sistema y, por consiguiente, la caída de la producción y el aumento de costes. Aquí radica la importancia del adecuado mantenimiento para las empresas.

El razonamiento basado en casos es una técnica metodológica que permite identificar las variables que afectan a un sistema provocando determinados efectos, tal como se ha expuesto anteriormente. También ofrece la reutilización de la experiencia pasada al facilitar la adquisición de conocimientos y el intercambio del mismo entre procesos, creando la oportunidad de aprender de las experiencias. En el mundo real, un experto interviene para diagnosticar un fallo de cualquier sistema industrial. El experto trata de recordar experiencias pasadas de fallos observados en situaciones similares que pueden conducir a resultados similares. Éste es el comportamiento que se trata de reproducir al utilizar el Razonamiento Basado en el Caso (CBR).

Este conocimiento adicional se basa en el modelado del conocimiento que viene dado por un modelo de representación en forma de ontología de dominio. El termino Ontología se utiliza en filosofía desde los tiempos de Aristóteles ([AP81], quien creó una ontología de las sustancias para tratar de adquirir conocimientos del mundo real a partir de la experimentación del mismo. Durante las últimas décadas, el concepto de Ontología Filosófica (escrito con mayúscula) ha originado la ontología computacional que hace referencia a la formulación de conceptos y sus relaciones taxonómicas dentro del dominio, de forma rigurosa

y exhaustiva. Este concepto es de uso intensivo en Inteligencia Artificial para describir a usuarios y entorno de forma accesible, interpretable y modificable ([HL09a],[CFLGP07a]).

Dentro de la ingeniería, una tarea muy importante es la elaboración de modelos que describan sistemas físicos, para especificar los productos y para describir su interacción con el entorno. Tradicionalmente, cada modelo se elaboraba para un propósito específico y, por tanto, un mismo elemento podía modelarse de varias maneras. En la actualidad, el desarrollo de las tecnologías ha propiciado la incorporación de las ontologías fuera de las áreas filosóficas y computacionales para facilitar los entornos colaborativos [GW12].

Construir una ontología es decidir qué entes o individuos existen, los conceptos y propiedades que los caracterizan y las relaciones que los unen.

Para identificar las variables, se desarrollará una ontología de dominio, que contendrá los conceptos y el vocabulario que describirán el campo de estudio. Dentro de esta ontología estarán definidos los elementos, sus características y las operaciones que les afectan.

En muchas situaciones, los problemas que encuentran los seres humanos se resuelven con un equivalente humano de CBR. Cuando una persona se encuentra con una nueva situación o problema, a menudo se referirá a una experiencia pasada obtenida en la resolución de un problema similar. Si la experiencia la vive otra persona, se habrá añadido el caso a la memoria colectiva humana ya sea por transmisión oral o escrita de esa experiencia. La idea del CBR es intuitivamente atractiva por su similitud con el comportamiento humano para resolver problemas.

Por lo tanto, CBR implica un razonamiento a partir de situaciones anteriores: retener un recuerdo de su definición, sus variables y sus soluciones para resolver nuevos problemas en función de ese conocimiento. Este es el principio que inspira la investigación sobre el uso de inteligencia artificial en la resolución de problemas, sus fases se muestran en la figura 3.1 y se describen a continuación.

3.5.1. Modelado del conocimiento.

El proceso de modelado del conocimiento seguirá entonces las siguientes fases [NDHMTK12]:

1. Se presenta un problema a un razonador basado en casos.
2. El razonador basado en casos busca en la memoria de casos del pasado otros casos que tengan las mismas especificaciones que el problema del nuevo caso bajo análisis.
3. Cuando se encuentra un caso idéntico al actual, si la solución que se le dio se considera acertada, se ofrecerá la misma solución para el problema actual.
4. Normalmente los casos recuperados no son idénticos al caso actual en análisis y es necesaria una fase de adaptación. Durante dicha adaptación, primero se identifican las diferencias entre los casos actuales y recuperados para posteriormente modificar

la solución teniendo en cuenta estas diferencias. La solución devuelta en respuesta a la especificación del problema actual puede entonces ser adecuadamente juzgada para la configuración del dominio considerado.

5. En el nivel más alto de abstracción, un sistema de razonamiento basado en casos puede ser visto como un caja negra, representado a menudo por un ciclo que incorpora el mecanismo de razonamiento y los siguientes pasos representados gráficamente en la figura 3.1:

- a) La especificación de entrada o Caso que plantea el nuevo problema.
- b) La salida que define una propuesta de solución al problema.
- c) La memoria de los casos anteriores, la base de casos, a la que se hace referencia por el mecanismo de razonamiento.

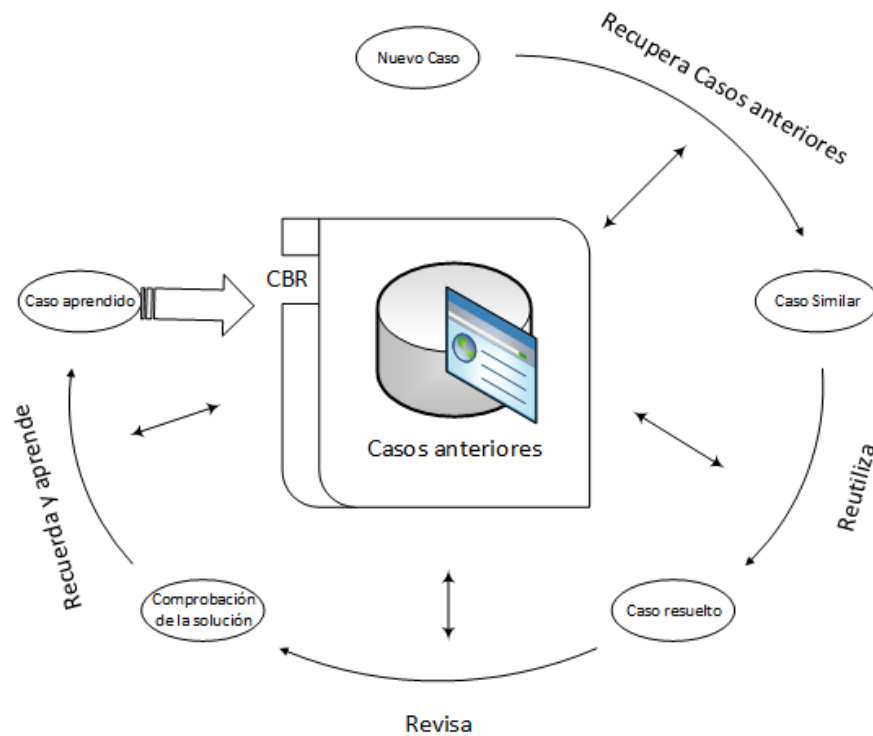


Figura 3.1: Fases del razonamiento basado en Casos (CBR)

La viabilidad del CBR como elemento de apoyo a la toma de decisiones, utilizando la experiencia de situaciones del pasado para gestionar las nuevas situaciones, esta avalada por numerosos estudios. De hecho, CBR y la gestión del conocimiento persiguen el mismo objetivo: la adquisición y la reutilización de la experiencia o el conocimiento pasado.

3.5.2. Razonamiento sobre ontologías.

El enfoque propuesto incluye el uso de ontologías para construir modelos de conocimiento de dominio general. Aunque en un sistema CBR la principal fuente de conocimiento es el conjunto de experiencias anteriores, nuestro enfoque de CBR se orientará hacia las aplicaciones integradas que combinan el conocimiento específico del caso con los modelos de conocimiento de dominio general. Cuanto más conocimiento esté incrustado en el sistema, más eficaz se espera que sea. Los procesos CBR semánticos pueden aprovechar este conocimiento del dominio y obtener resultados más precisos. Los grandes sistemas, como los sistemas eléctricos, se diseñan y construyen para realizar un largo ciclo de vida. Es de esperar que, durante esa vida, se produzcan múltiples cambios que les afectan. Los cambios pueden tener causas internas, por los propios cambios naturales de los elementos que componen el sistema, y causas externas, debidos a las influencias del entorno en el que se ubica el sistema. A la hora de utilizar un modelo de conocimiento que permita afrontar los retos de la toma de decisión en estas circunstancias, la utilización de ontologías presenta ventajas frente a las bases de datos/taxonomías que se han empleado tradicionalmente como base de la toma de decisiones. Sin embargo, este paso requiere que, en el diseño de las ontologías empleadas para describir el sistema, se haya tenido en cuenta la necesidad de adaptación a los cambios sin perder la historia pasada del sistema, pues el pasado condiciona el estado actual del mismo [GW12]. El estado actual de las ontologías permite conceptualizar mejor las necesidades para el modelado de los procesos empresariales al integrar fuentes de información diversas, como pueden ser procedimientos, eventos, descripciones, planos, componentes, modelos, etc, y manipularlas de manera simultánea. En los sistemas de CBR, las ontologías juegan un papel importante, pues aportan un vocabulario para describir los casos, una estructura de conocimiento que facilita encontrar los casos y sirven como fuente de conocimiento que permite el razonamiento semántico en los métodos de cálculo de similitud, la adaptación y el aprendizaje basado en la aplicación de proceso de razonamiento. Una ventaja adicional, aprovechada en este trabajo, es la versatilidad que supone el uso de las ontologías y los métodos de decisión muticriterio como herramientas de soporte a la decisión. Esta ventaja se desarrolla en el capítulo 4 en la aplicación práctica de selección de trabajos de mantenimiento. Las etapas necesarias para modelar el sistema en estudio se desarrollan en los apartados siguientes.

Desarrollo de las ontologías.

1. Se construye un ontología que recoge el conocimiento sobre las instalaciones necesario para planificar los trabajos.
2. Se obtiene la ontología de las instalaciones para determinar los criterios apropiados para diseñar un modelo que incluya las preferencias del decisor y las características del contexto para la planificación de las tareas.

3. Se desarrollan un modelo de preferencias del decisor y un modelo de contexto utilizando los criterios obtenidos.
4. Con el fin de combinar esos modelos para crear una planificación de trabajos útil para el decisor se emplea una técnica de decisión multicriterio basada en una estructura jerárquica y comparación de pares.
5. Finalmente, el resultado final del algoritmo se implementa y verifica en una aplicación práctica.

Arquitectura de planificación de los trabajos basada en ontologías.

El uso de una ontología para la toma de decisiones permite presentar al decisor información sobre sus preferencias y sobre el contexto. En el presente trabajo, para desarrollar un método de planificación de trabajos de mantenimiento de instalaciones, se diseñó un modelo abstracto basado en una ontología de entidades y trabajos. Un modelo conceptual establece una estrategia de trabajo, un esquema general de conceptos y sus interrelaciones [W⁺03]. En el modelo presentado aparecen los componentes esenciales: la ontología diseñada, los criterios, el modelo y un sistema Sistema de Información Geográfica (GIS), necesario para ubicar las tareas en el espacio.

Criterios utilizados en la ontología de planificación de trabajos.

Para ajustar el sistema de soporte a la toma de decisiones en la planificación de trabajos de mantenimiento, es muy importante determinar todos los criterios relativos a cada trabajo. En este estudio, utilizaremos un método basado en ontologías para obtener dichos criterios. El uso de ontologías es una manera de compartir, reutilizar y procesar conocimientos recurrente en la literatura científica de los últimos años, aplicadas a diversas áreas además de la computación, donde tuvo sus orígenes. Las ontologías representan un nivel de descripción sobre el conocimiento de un sistema que es independiente de la estructura interna de la misma. El uso de una ontología ofrece algunas ventajas como determinar los criterios apropiados para el decisor y el modelado del contexto, jugando un papel alternativo a la presencia de expertos en el proceso de toma de decisiones, permitiendo inferencias y modelando el conocimiento sobre el dominio.

En este estudio, se utilizan las ontologías como una herramienta que permite imitar el papel de los expertos, con memoria de experiencias pasadas, en procesos de toma de decisiones. Además permiten interactuar con el sistema para tareas de análisis en la generación de nuevo conocimiento. En primer lugar se genera una ontología de dominio específico.

Ontología de dominio específico. El modelo conceptual se define por medio de una ontología de dominio específico, que consiste en un conjunto de expresiones dentro del mo-

delo cuyo propósito es representar algún aspecto de los objetos modelados al tiempo que describen el conocimiento del dominio para la evaluación del modelo de toma de decisiones. En general, una ontología de dominio específico modela una parte del mundo real. Representa el significado particular de los términos en dicho dominio. Adicionalmente, aporta una estructura conceptual del problema subyacente, donde la información es recogida y orientada para el sistema estudiado.

En primer lugar, se investigó la existencia de una ontología apropiada para la representación de los trabajos de mantenimiento en instalaciones eléctricas. Una vez confirmado que las ontologías existentes no representan con el nivel de detalle requerido las tareas objeto de este estudio, se optó por construir una ontología de dominio específica adaptada al caso de estudio [NK09a].

Ontología de Entidades Una vez establecida la ontología de dominio específico, se crea la ontología de entidades.

Para este estudio, el concepto de entidad hace referencia a cada uno de los elementos que componen las instalaciones:

Redes → Circuitos y Subestaciones

Para la creación de la ontología de entidades se determinaron las características propias de cada entidad pensando en la influencia en la selección de trabajos. Dichas características se dividen en dos grupos: variables de contexto y variables de usuario decisor. En las variables del decisor incluyen factores que definen las preferencias del decisor.

La ubicación geográfica de una entidad es un factor importante en el conocimiento del contexto. Por ello será necesario utilizar un módulo GIS para caracterizar dicha variable.

Ontología de trabajos Para completar el modelo de decisión, se creó una ontología de trabajos en la que se recogen las características de los mismos que son útiles para la toma de decisión. En cada trabajo concurren factores intrínsecos y extrínsecos.

3.5.3. Aplicación de razonamiento basado en casos.

Este componente se utiliza para el diagnóstico del problema mediante las cuatro tareas del proceso CBR:

1. Recuperar los casos más similares.
2. Reutilizar conocimientos para resolver el problema.
3. Revisar la solución propuesta.
4. Retener la experiencia.

Se implementará atendiendo a los siguientes principios:

- **Representación del Caso.** Los casos en la base de casos se deben describir por medio del vocabulario proporcionado por el modelo de dominio. Esta descripción debe permitir decidir sobre el tipo y la estructura del caso dentro del dominio de conocimiento.
- **Búsqueda y recuperación de casos.** Cuando tratamos con ontologías, la propia estructura jerárquica de la misma influye en el concepto de similitud de la evaluación. Existen dos formas básicas de recuperar casos:
 - **Recuperación basada en la Clasificación.** Se construye un concepto o una descripción individual utilizando las restricciones especificadas en la consulta. Este concepto/individuo se clasifica para finalmente recuperar todos los elementos relacionados con él en la base de casos.
 - **Recuperación Computacional.** Utiliza funciones numéricas de similitud para evaluar y ordenar los casos con respecto a la consulta. El uso de representaciones estructuradas de los casos requiere enfoques para la evaluación de la similitud que permiten la comparación de dos objetos estructurados de forma diferente, en particular, los objetos que pertenecen a diferentes clases de objetos.

El objetivo es determinar la similitud entre dos objetos, es decir, un objeto que representa el caso (o una parte de ella) y un objeto que representa la consulta (o una parte de ella). Una manera de determinar dicha similitud es hallar para cada atributo simple, una medida de similitud local entre los dos valores de atributo de ambos objetos, y para cada elemento relacionado con dicho atributo se realizará una medida de similitud comparando recursivamente los dos sub-objetos relacionados. A continuación, los valores de los parámetros locales y relacionales de similitud se agregan a la similitud global entre los objetos que se comparan.

- **Adaptación del Caso.** La adaptación del caso juega un papel fundamental en la capacidad de los sistemas de CBR para resolver nuevos problemas. El enfoque deseado se fundamenta en la representación explícita de conocimiento terminológico general sobre el dominio. De esa manera, la adaptación del conocimiento se representa explícitamente en la taxonomía del dominio de conocimiento, indicando que los casos individuales que están cerca en la taxonomía son eventualmente intercambiables. Se propone utilizar un modelo basado en la ontología y un esquema de adaptación basado principalmente en eliminaciones y sustituciones, fácilmente adaptable. Las dependencias dentro de un caso se representan explícitamente con el fin de orientar la adaptación.
 - Si se retira un elemento también se eliminan los elementos dependientes.

- Si un elemento e_1 se sustituye por otros elementos e_2 entonces los elementos dependientes son sustituidos.

La búsqueda de sustitutos es guiada por la ontología. Se requiere adaptación cuando el caso recuperado: a) no cumple todos los objetivos necesarios establecidos en la consulta, o b) cuando el caso recuperado resuelve metas que son diferentes de los de la consulta. Habrá que suprimir y/o sustituir elementos para adaptar los resultados al nuevo caso. En [NDHMTK12] se propone un mecanismo de adaptación en el que se propagan los cambios de la descripción a los elementos de la solución, de la siguiente manera:

- Se obtiene la lista L de casos individuales que necesitan ser adaptados. Para ello se sigue una trayectoria relacional de un concepto.
 - Cada elemento de L se sustituye por otro nuevo adecuado. La búsqueda de sustitutos adecuados se lleva a cabo de manera especializada aprovechando la lógica descriptiva sobre la base de conocimiento de casos y aplicando funciones de similitud para encontrar un sustituto que sea similar al sustituido.
 - Se sustituyen elementos que dependen de otros donde la solución ya ha sido adaptada.
- Mediador. Es responsable por un lado de mantener la consistencia de la base de conocimiento y, por otro, de inferir nuevos conocimientos que no están explícitamente definidos, pero que pueden ser deducidos.

3.6. Influencia de las variables.

El uso de la palabra sistema implica dos conceptos esenciales [Lay76b]:

1. El concepto de interacción entre un conjunto de entidades contenida dentro del sistema considerado,
2. El concepto de un límite, real o imaginario, separando los elementos internos al sistema de los elementos externos.

En los sistemas físicos, las entidades de interés son las magnitudes (generalmente variables en el tiempo) de ciertas cantidades físicas presentes en el sistema, estas magnitudes estarán relacionadas entre sí por leyes físicas. Las influencias externas al sistema considerado producen efectos sobre las magnitudes internas del sistema. Sin embargo, la influencia no tiene por qué ser recíproca y, por lo tanto, el comportamiento de las variables externas puede ser completamente arbitrario a lo largo del tiempo, al no estar influenciado por los cambios del sistema.

Cuando se trata de controlar un sistema, el objetivo consiste en regular determinadas magnitudes para lograr que varíen a lo largo del tiempo de una manera determinada. Esas magnitudes serán las *salidas* del sistema. Normalmente las salidas de todo sistema serán medibles. Es importante señalar que los límites del sistema son completamente elásticos, se pueden fijar o cambiar a voluntad con la precaución de recordar cuáles son los límites en cada momento del análisis.

3.6.1. Las variables en el control de procesos.

La naturaleza se presenta en forma de procesos con una lógica básica de causa-efecto. Las leyes naturales de causa-efecto son de aplicación en los sistemas descritos anteriormente. Una representación típica de los procesos productivos es el esquema de la figura 3.2, utilizado en la literatura sobre sistemas de control.

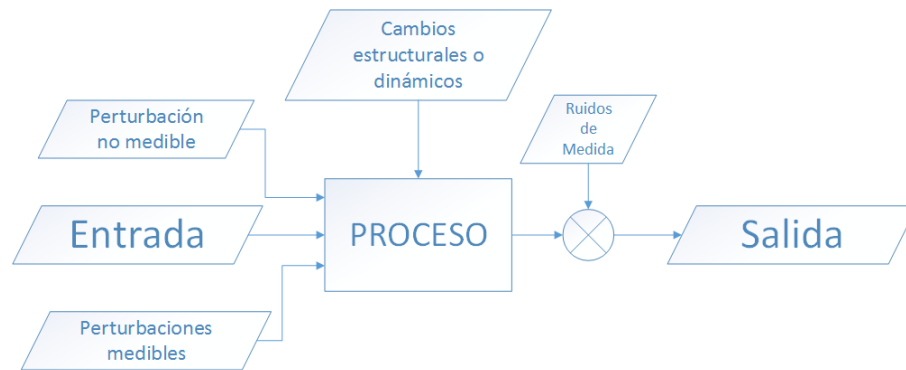


Figura 3.2: Representación esquemática de un proceso.

Los procesos evolucionan con el tiempo de acuerdo a su propia dinámica, en general sujeta a cambios, y en respuesta a acciones externas, que serán modeladas como entradas del sistema. Las variables de entrada se pueden agrupar en dos grandes tipos:

- Variables de control. Variables normalmente medibles, cuyo valor de entrada puede ser ajustado o regulado de alguna manera conocida.
- Perturbaciones. Variables, medibles o no, cuyo valor de entrada es desconocido, lo mismo que las leyes de su variación.

La principal diferencia entre ambas consiste en que sólo las primeras pueden ser manipuladas.

Estrategia básica de control.

El objetivo básico de controlar un proceso es lograr que la salida del mismo sea la que se quiere conseguir. Lo podemos expresar matemáticamente como:

$$\hat{y}(k+1|k) = y_d(k+1|k) \quad (3.4)$$

siendo:

$\hat{y}(k+1|k)$ la salida real del sistema en el instante $k+1$ predicha en el instante k

y

$y_d(k+1|k)$ la salida deseada en el instante $k+1$ calculada en el instante k .

Control de procesos actuando sobre las variables de entrada.

El autor [SR05a] afirma que es posible predecir el comportamiento de los procesos físicos en instantes discretos de tiempo consecutivos sin entrar en un análisis profundo del comportamiento de cada uno de los elementos que componen el sistema, cuya representación matemática incluiría resolver un sistema de ecuaciones diferenciales mucho más complejo y de parámetros desconocidos. Propone un modelo que incorpora los estados de las variables en dos instantes de control anteriores para calcular una curva de tendencia que permita calcular el valor de la salida en instantes futuros. De manera genérica, se puede describir un proceso monovariante mediante la siguiente ecuación:

$$\hat{y}(k+1) = \sum_{i=1}^n a_i y(k+1-i) + \sum_{j=1}^m b_j u(k+1-j) + \sum_{h=1}^p c_h w(k+1-h) + \Delta(k) \quad (3.5)$$

donde y , u y w representan las variables de salida, entrada y perturbaciones medibles, y a_i , b_j , c_h son los parámetros que ponderan la influencia de dichas variables en la predicción hecha por el modelo. El vector de perturbaciones $\Delta(k)$ representa los ruidos y las perturbaciones no medibles que influyen en el proceso. Este vector permite el ajuste de la salida $\hat{y}(k+1)$ a la salida real obtenida $y(k+1)$ en sucesivos períodos de muestreo. La tendencia natural sería incorporar la mayor cantidad de datos históricos disponibles. Sin embargo, la curva de tendencia podría modificarse para ajustarse a los valores más antiguos y perder precisión en la predicción. El resultado del modelo no tiene por qué ser necesariamente mejor por ese motivo² pues los valores medidos más antiguos tendrán normalmente una influencia menor en el valor estimado actual, y, por tanto, los valores más recientes serán los más relevantes.

Del mismo modo, la tendencia a incluir más variables en el modelo tampoco redundará necesariamente en una mejora de la predicción. La influencia de la mayoría de las variables

²Los datos de la temperatura de la habitación tomados cada 5 minutos durante 24 horas son elementos de confusión más que ayudar en la predicción. Si ayer estaba nublado a las 15:00 y la temperatura exterior era de 15°C y hoy hace sol y la temperatura a las 15:00 es de 22°C, las variaciones de temperatura en ambos casos serán muy diferentes y la evolución de ayer en el intervalo de 15:00 a 15:05 no revelará nada sobre cómo va a evolucionar hoy la temperatura de 15:00 a 15:05.

no se dejará notar en instantes consecutivos, por lo que se pueden considerar constantes y eliminarlas del modelo sin pérdida de precisión³

De manera genérica, describiremos un proceso multivariable mediante la siguiente ecuación:

$$\hat{Y}(k+1) = \sum_{i=1}^n A_i Y(k+1-i) + \sum_{j=1}^m B_j U(k+1-j) + \sum_{h=1}^p C_h W(k+1-h) + \Delta(k) \quad (3.6)$$

donde Y, U y W son los vectores de salidas, entradas y perturbaciones medibles, y A_i, B_j, C_h son las matrices de pesos que ponderan la influencia de dichos vectores en la predicción hecha por el modelo. El vector de perturbaciones $\Delta(k)$ representa los ruidos y las perturbaciones no medibles que influyen en el proceso. Este vector permite el ajuste de la salida $\hat{Y}(k+1)$ a la salida real obtenida $Y(k+1)$ en sucesivos períodos de muestreo.

Control Predictivo de procesos.

El control Predictivo se introdujo en 1974 en [MS74] y se expresa de la siguiente forma *"Basándose en un modelo del proceso, el control predictivo es el que hace que la salida dinámica del proceso predicha por un modelo sea igual a una salida dinámica deseada convenientemente elegida"*. En la figura 3.3 se representa gráficamente este concepto.

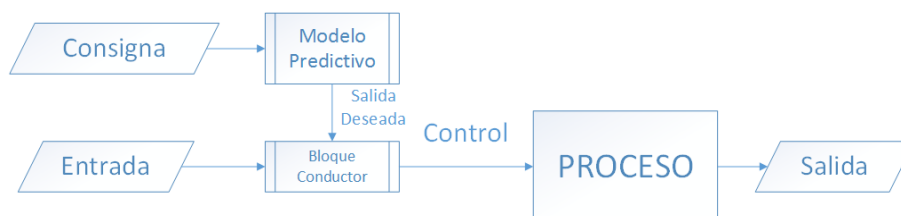


Figura 3.3: Representación esquemática del control predictivo de un proceso.

$$U(k) = \frac{Y_d(k+1) - \sum_{i=1}^n A_i Y(k+1-i) - \sum_{j=2}^m B_j U(k+1-j) - \sum_{h=1}^p C_h W(k+1-h) - \Delta(k)}{B_1} \quad (3.7)$$

El control predictivo permite conseguir las salidas deseadas del proceso modificando las entradas, es decir, es el que cumple que:

³Del mismo modo, no por incorporar más variables al modelo, éste va a ser más preciso. En el mismo supuesto, variables como la temperatura exterior o la humedad relativa del aire condicionan la evolución de la temperatura de la habitación, pero su variación en el tiempo va a ser más lenta, por lo que influyen casi idénticamente en los instantes $t(k-1), t(k)$ y $t(k+1)$. De tal manera que, al eliminarlos de todas las ecuaciones, el resultado va a ser muy similar.

$$\hat{Y}(k+1) = Y_d(k+1) \quad (3.8)$$

Si la predicción realizada por el modelo es correcta, la aplicación de control predictivo en intervalos regulares de tiempo hará que los sucesivos valores de las variables de salida, medidas en cada intervalo, sean iguales a los sucesivos valores predichos, es decir, las variables medidas seguirán una trayectoria deseada que, si se ha elegido para que sea físicamente realizable, permitirá obtener la salida pretendida de manera rápida y eficaz. Sobre esta idea, se construirá el modelo de decisión en el capítulo 4 pero previamente es necesario comprender algunos efectos que condicionan este modelo antes de aplicarlo en situaciones reales. En todo proceso, los cambios en las variables o las perturbaciones que le afectan, producirán dos efectos:

1. Tenderán a desviar de la consigna la variable bajo control.
2. Cambiarán la relación dinámica entre las variables de entrada y salida del proceso.

Cuando se intenta predecir lo que ocurrirá en el futuro, el peor efecto es el cambio en la dinámica del proceso. Puesto que nuestra intención es replicar la intuición humana a la hora de tomar decisiones, es necesario recurrir a un único modelo matemático que cubra el proceso mientras no haya intervención humana, siendo capaz de resolver todos los problemas que se le presenten. Si el proceso cambia, el modelo debe cambiar o el error cometido por el "no cambio" debe ser admisible (pérdida de eficiencia, retrasos, ...)

Un modelo predictivo basado en parámetros estáticos no es útil en un entorno no controlado, pues las variaciones en las variables y las perturbaciones del entorno de operación se producen de forma natural. Nuestro objetivo es conseguir un modelo que permita conocer con precisión la salida del proceso a partir de las entradas del mismo. En los sistemas complejos, la opción del análisis exhaustivo de todas las variables que intervienen, suponiendo que fuese posible matemáticamente, sería restrictivo por el volumen de datos que es necesario manejar. En este ambiente, se vuelve muy interesante la idea de ajustar los parámetros de un modelo que se adapte al proceso y permita predecir la salida con precisión, con un conocimiento limitado de las variables o perturbaciones del entorno.

Sistemas adaptativos.

La idea de la adaptación aplicada a sistemas fue propuesta inicialmente en trabajos como [ÅE71] y [Men73]. Se basa en dotar al modelo de predicción de un mecanismo de adaptación. Para adaptarse, es necesario replicar el proceso de aprendizaje humano utilizando la información disponible. Esta información vendrá dada fundamentalmente por las variables de entradas y salidas del modelo predictivo que se pretende ajustar y por los propios errores de predicción del modelo. Dichos errores, al producirse en los sucesivos instantes de muestreo, irán añadiendo un valor incremental sobre el conocimiento previo de la dinámica

del proceso. Este conocimiento se representa por el cambio del valor de los parámetros del modelo.

Matemáticamente, la expresión sería la siguiente:

$$a_i(k) = a_i(k - 1) + \Delta_{a_i}(\varepsilon(k)); \quad i = 1, 2, \dots \quad (3.9)$$

$$b_i(k) = b_i(k - 1) + \Delta_{b_i}(\varepsilon(k)); \quad i = 1, 2, \dots \quad (3.10)$$

siendo a_i y b_i los parámetros de ponderación de los vectores de salida $y(k)$ y de entradas $u(k)$ respectivamente.

En lenguaje natural, esto significa que el valor de cada uno de los parámetros del modelo en el instante de muestreo k será generado por el mecanismo de adaptación, sumando al valor del parámetro en el instante anterior $k - 1$ una función incremental que depende del error de predicción $\varepsilon(k)$ producido en el instante k . De esta forma se consigue [CMSSF86]:

- Si en el instante k el modelo produce la salida deseada sin error ($\varepsilon(k) = 0$), parece evidente que interesa conservar el conocimiento que poseemos de la dinámica del proceso y, por tanto, los parámetros no deben variarse.
- En el caso de que el error en el instante k fuese distinto de cero, habrá que variar los parámetros del modelo para corregir el desvío. Esa corrección se hará sobre los valores previos de los parámetros del modelo (que aportan la base de conocimiento) mediante una función incremental que aporta el nuevo conocimiento aprendido en el último muestreo.

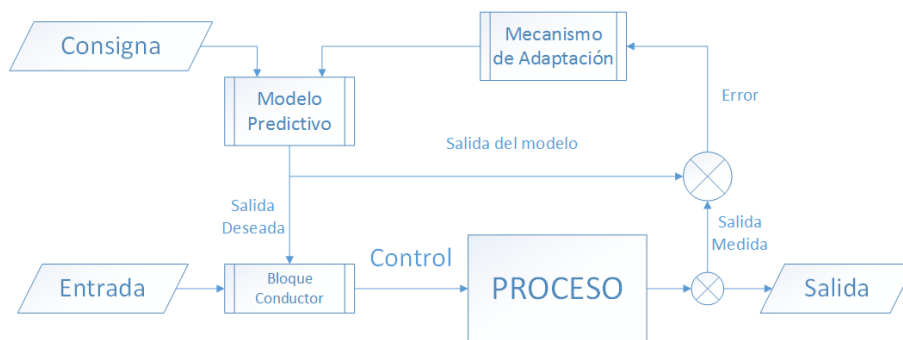


Figura 3.4: Esquema de un sistema adaptativo simple.

Los sistemas adaptativos en sistemas industriales responden en general a un esquema tal como el representado en la Figura 3.4. La señal de entrada al proceso se aplica simultáneamente al modelo adaptativo y las salidas de ambos se comparan para producir una señal de error, a partir de la cual un mecanismo de corrección ajusta los parámetros del modelo adaptativo. Al identificar las entradas y salidas del proceso como únicos elementos de control del mismo, cuya relación dinámica viene determinada intrínsecamente por ecuaciones, se produce una notable simplificación del problema. No hay que conocer todas las varia-

bles ni calcular todas sus variaciones, pues el modelo incorpora todo ese conocimiento en el valor de los parámetros en los instantes de muestreo anteriores. La operación de este tipo de mecanismos de adaptación asegura que el valor absoluto del error considerado por el modelo permanecerá acotado, a partir de un cierto instante de muestreo, por el menor límite posible de acuerdo con el nivel de ruidos y perturbaciones actuando sobre el proceso. Si no existieran ruidos y perturbaciones, el error tendería asintóticamente hacia cero.

Modelo de referencia.

Vamos a aplicar el principio de superposición de acciones para conseguir el objetivo deseado: alcanzar el valor de salida deseado en el menor tiempo posible y con la trayectoria más ajustada posible a la forma de transición deseada.

Partimos del modelo general:

$$y(k) = \sum_{i=1}^n a_i y(k-i) + \sum_{i=1}^m b_i u(k-i) + \sum_{i=1}^p c_i w(k-i) + \Delta(k) \quad (3.11)$$

donde

$y(k-i)$, $u(k-i)$, $w(k-i)$ son las salidas, entradas y perturbaciones medibles del proceso en el instante $k-i$ respectivamente y $\Delta(k)$ representa las perturbaciones del proceso.

La predicción que este modelo permite hacer para el instante $k+1$ en el instante k será:

$$\hat{y}(k+1|k) = \sum_{i=1}^n \hat{a}_i y(k+1-i) + \sum_{i=1}^m \hat{b}_i u(k+1-i) \quad (3.12)$$

La trayectoria deseada proyectada TDP_k permite calcular la salida en $k+1$ mediante la ecuación:

$$y_d(k+1|k) = \sum_{i=1}^p \alpha_i y(k+1-i) + \sum_{i=1}^q \beta_i y_s p(k+1-i) \quad (3.13)$$

Y en este punto es posible calcular la entrada del proceso con la siguiente ecuación:

$$u(k) = \frac{y_d(k+1|k) - \sum_{i=1}^{\hat{n}} \hat{a}_i y(k+1-i) - \sum_{i=2}^{\hat{m}} \hat{b}_i u(k+1-j)}{\hat{b}_1} \quad (3.14)$$

siendo \hat{a}_i , \hat{b}_i los parámetros del modelo adaptativo vistos para el instante k desde el instante $k-1$.

Consideraremos que en el instante inicial $k=0$, el proceso está en equilibrio con las variables de entrada y salida iguales a cero. A partir de esta situación, aplicaremos la ley de control 3.14 con el propósito de conducir la salida del proceso a su consigna, que es igual

a y_d . La salida deseada para el instante siguiente se calcula de acuerdo con la ecuación 3.13 a partir de la consigna y de las salidas previas del proceso en los instantes $k = 0$ y $k = -1$ (ambas son iguales a 0), resultando $y_d(1|0) = y(1)$.

Como hemos considerado previamente, el valor de $y_d(1|0)$ pertenece a una trayectoria deseada proyectada TDP_0 que evoluciona hacia la consigna de acuerdo con la dinámica elegida al designar los parámetros de la ecuación 3.12. A partir del valor de $y_d(1|0)$, la ley de control 3.14 calcula la acción de control, que resulta ser:

$$u(k = 0) = u(0).$$

Se aplica esta acción en $k = 0$ y se observa la salida en $k = 1$.

En la figura 3.5, se aprecia la evolución de las trayectorias deseadas proyectadas, desde

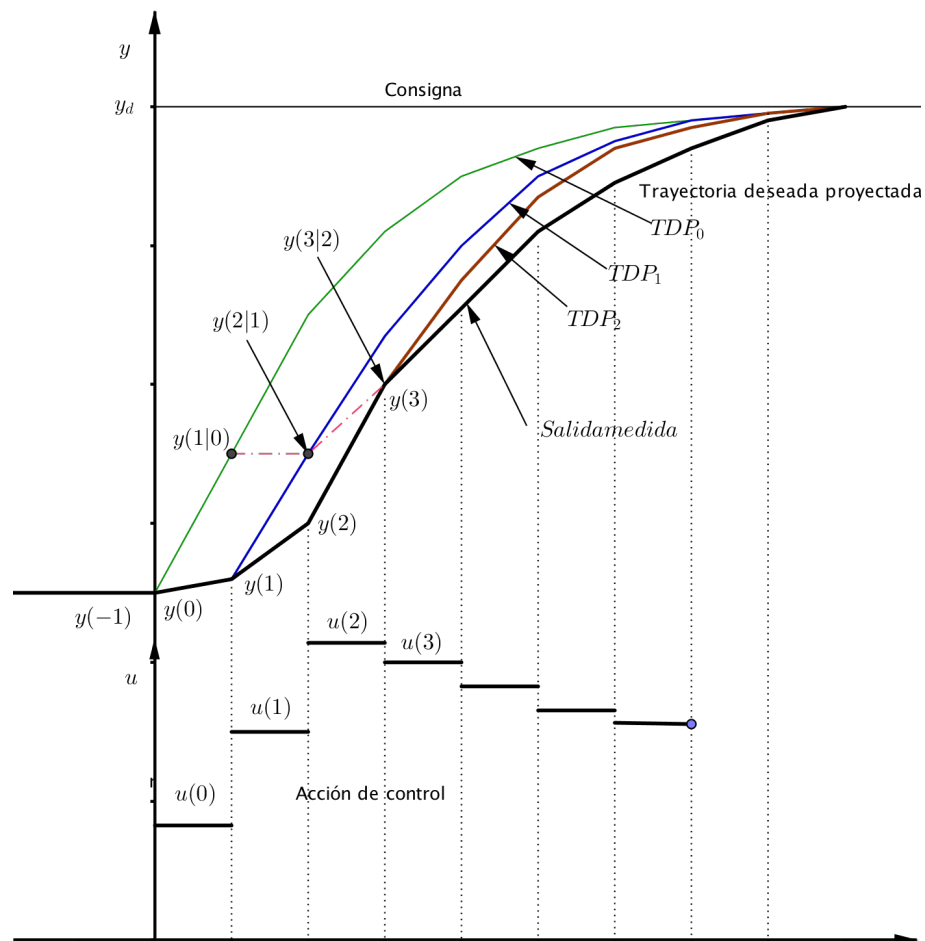


Figura 3.5: Trayectorias deseadas de salida y acción de control en la entrada para cada instante de control.

TDP_0 hasta TDP_2 y como se va ajustando el trazado de dichas trayectorias a medida que se produce un error en la predicción. Así, puesto que la salida $y(1) \neq y_d(1|0)$ se procede a calcular la nueva TDP_1 a partir de la salida real del sistema $y(1)$.

El proceso continúa todas las veces necesarias hasta conseguir que la salida del proceso alcance el valor de consigna establecido. Las acciones de corrección son cada vez menos bruscas y más afinadas, permitiendo un mejor aprovechamiento de los recursos (véase la figura 3.5).

Hasta este punto se ha incorporado en el modelo matemático del sistema la información sobre el pasado del proceso con el conocimiento aportado por las salidas del proceso en los instantes k y anteriores. Para evaluar el comportamiento del modelo utilizaremos un criterio de rendimiento tal como se propone en [RS82].

Utilizando la información sobre las entradas y salidas conocidas en el instante k , existirá un horizonte de predicción $[k, k + \lambda]$ definido por un número λ de periodos de control, en el que se puede predecir una secuencia de salidas $\hat{y}(k + j|k)$ mediante un modelo en función de una secuencia de controles $\hat{u}(k + j - 1|k)$, donde $j = 1, 2, \dots, \lambda$ [MZM84].

En la figura 3.6 representamos la evolución de las salidas $\hat{y}(k + j|k)$ del proceso en función de una secuencia de control $\hat{u}(k + j - 1|k)$ donde $j = 1, 2, \dots, \lambda$ a partir del instante k para el intervalo $[k, k + \lambda]$.

Las ecuaciones serán:

$$\hat{y}(k + j|k) = \sum_{i=1}^{\hat{n}} \hat{a}_i \hat{y}(k + j - i|k) + \sum_{i=1}^{\hat{m}} \hat{b}_i \hat{u}(k + j - i|k) \quad (3.15)$$

$$j = 1, 2, \dots, \lambda$$

donde

$$\hat{y}(k + 1 - i|k) = y(k + 1 - i); i = 1, \dots, \hat{n} \quad (3.16)$$

$$\hat{u}(k + 1 - i|k) = u(k + 1 - i); i = 1, \dots, \hat{m} \quad (3.17)$$

siendo $y(k + 1 - i)$ la salida medida y $u(k + 1 - i)$ la entrada aplicada en el instante k .

Criterio de rendimiento, trayectoria deseada proyectada y acción de control.

El rendimiento de la estrategia de control se fundamenta en la minimización de una función de coste diseñada de forma que la salida del proceso sea tan próxima a la deseada como sea posible, mientras las acciones de control requeridas sean realizables fácilmente. Para conseguir este compromiso entre ambos elementos, se formula la siguiente ecuación de coste:

$$J_k = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\lambda} Q_j [\hat{y}(k + j|k) - y_r(k + j|k)]^2 + \frac{1}{2} \sum_{j=0}^{\lambda-1} R_j [\hat{u}(k + j|k)]^2 \quad (3.18)$$

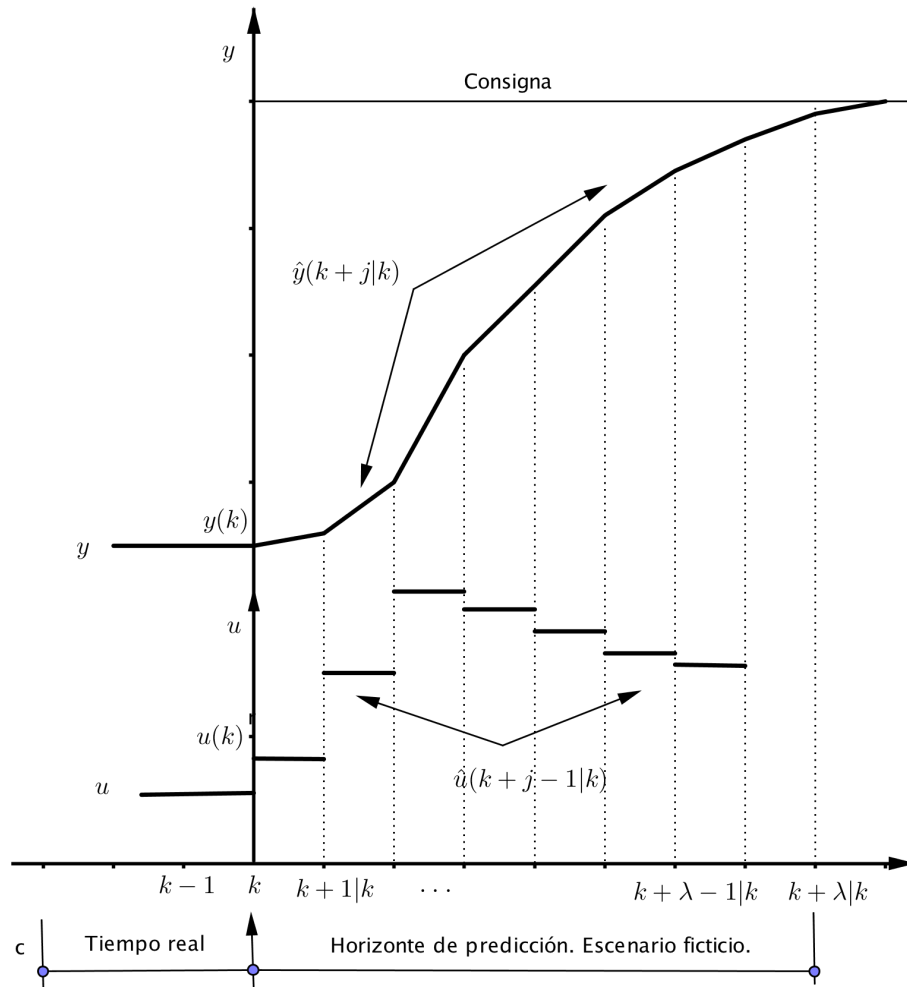


Figura 3.6: Horizonte de predicción del modelo.

donde $y_r(k + j|k)$ es una trayectoria de referencia que se genera para el horizonte de predicción $[k, k + \lambda]$ de la siguiente forma:

$$y_r(k + j|k) = \sum_{i=1}^p \alpha_i y_r(k + j - i|k) + \sum_{i=1}^q \beta_i y_{sp}(k + j - i) \quad j = 1, 2, \dots, \lambda \quad (3.19)$$

donde

$$y_r(k + 1 - i|k) = y(k + 1 - i), \quad i = 1, \dots, p \quad (3.20)$$

siendo y_{sp} la consigna deseada.

Se elige esta función cuadrática para garantizar que existe un mínimo que será el óptimo de funcionamiento [Cla88]. Puesto que en cada instante k se define una trayectoria deseada proyectada, la única acción que se aplicará será la primera de cada secuencia de control. Calcular el mínimo en cada instante para un sistema complejo con un planteamiento adaptativo puede convertirse en una tarea imposible por el esfuerzo de cómputo. Con este planteamiento el problema se reduce a resolver un sistema de minimización en un horizonte finito con λ incógnitas:

$$\hat{u}(k|k), \hat{u}(k + 1|k), \dots, \hat{u}(k + \lambda - 1|k) \quad (3.21)$$

Solución matemática general. La resolución matemática del sistema de forma genérica realizado en [SR05a] conduce a la siguiente expresión matricial para las entradas de control:

$$\hat{U} = -[G_0^T Q G_0 + R]^{-1} G_0^T Q [E Y_k + G U_k - Y_r] \quad (3.22)$$

donde

G_0, E y G son matrices de coeficientes obtenidos a partir de los parámetros \hat{a}_i y \hat{b}_i del modelo de predicción.

Q y R son las matrices de pesos de ponderación de la influencia de las salidas y las entradas en la función de coste.

Y_k es el vector de salidas medidas en el instante k .

U_k es el vector de entradas de control en el instante k .

Y_r es el vector que define la trayectoria de referencia para la salida.

\hat{U} es el vector de entradas de control necesarias.

Este sistema proporciona la secuencia de control completa que minimiza la función de coste J_k en todo el intervalo $[k, k + \lambda]$. Sin embargo, no es necesario resolver todo el sistema matricial puesto que sólo se va a aplicar una acción de control en cada instante de muestreo.

Para el siguiente instante de muestreo se recalculan de nuevo todos los parámetros. Por lo tanto, resolviendo simplemente la ecuación:

$$u(k) = \hat{u}(k|k) = -g_0^T [EY_k + GU_k - Y_r] \quad (3.23)$$

donde g_0^T es la primera fila de la matriz $[G_0^T Q G_0]^{-1} G_0^T Q$

La complejidad de este tipo de ecuaciones se debe fundamentalmente al número de incógnitas. El modo de reducir este número se explica en el próximo apartado.

Solución simplificada. La simplificación consiste en:

1. Considerar la secuencia de control constante en el intervalo de predicción:

$$\hat{u}(k|k) = \hat{u}(k+1|k) = \dots = \hat{u}(k+\lambda-1|k) \quad (3.24)$$

2. Tomar los valores de peso de la función de coste como:

- $Q_j = 0 \quad (j = 1, \dots, \lambda - 1) \quad Q_\lambda = 1$
- $R_j = 0 \quad (j = 0, 1, \dots, \lambda - 1)$

La función de coste resultante pasa a ser:

$$J_k = \frac{1}{2} [\hat{y}(k+\lambda|k) - y_r(k+\lambda-1|k)] \quad (3.25)$$

De aquí, se puede calcular la acción de control, pues es la única incógnita $u(k) = \hat{u}(k|k)$ de la ecuación de la trayectoria de referencia:

$$\hat{y}(k+\lambda|k) = \sum_{i=1}^{\hat{n}} \hat{e}_i^{(\lambda)} y(k+1-i) + \sum_{i=2}^{\hat{m}} \hat{g}_i^{(\lambda)} u(k+1-i) + \hat{h}^{(\lambda)} \hat{u}(k|k) \quad (3.26)$$

donde

$$\hat{h}^{(\lambda)} = \hat{g}_1^{(\lambda)} + \hat{g}_1^{(\lambda-1)} + \dots + \hat{g}_1^{(1)} \quad (3.27)$$

Sustituyendo y despejando después de imponer $J_k = 0$ se obtiene:

$$u(k) = \hat{u}(k|k) = \frac{y_r(k+\lambda|k) - \sum_{i=1}^{\hat{n}} \hat{e}_i^{(\lambda)} y(k+1-i) - \sum_{i=2}^{\hat{m}} \hat{g}_i^{(\lambda)} u(k+1-i)}{\hat{h}^{(\lambda)}} \quad (3.28)$$

con

$$\hat{e}_i^\lambda = \hat{e}_1^{(\lambda-1)} \hat{a}_i + \hat{e}_{i+1}^{(\lambda-1)}; \quad i = 1, \dots, \hat{n}; \quad j = 2, \dots, \lambda \quad (3.29)$$

$$\hat{g}_i^\lambda = \hat{e}_1^{(\lambda-1)} \hat{b}_i + \hat{g}_{i+1}^{(\lambda-1)}; \quad i = 1, \dots, \hat{m}; \quad j = 2, \dots, \lambda \quad (3.30)$$

$$\hat{h}^{(\lambda)} = \hat{g}_1^{(\lambda)} + \hat{g}_1^{(\lambda-1)} + \dots + \hat{g}_1^{(1)} \quad (3.31)$$

siendo

$$\hat{e}_i^{(1)} = \hat{a}_i; \quad i = 1, \dots, \hat{n};$$

$$\hat{e}_{\hat{n}+1}^{(\lambda-1)} = 0; \quad j = 1, \dots, \lambda;$$

$$\hat{g}_i^{(1)} = \hat{b}_i; \quad i = 1, \dots, \hat{m};$$

$$\hat{g}_{\hat{m}+1}^{(\lambda-1)} = 0; \quad j = 2, \dots, \lambda;$$

Éste es el modelo que utilizaremos para obtener los valores en los próximos apartados.

Explicación conceptual Para ilustrar de forma intuitiva el modelo, vamos a explicarlo sobre una situación habitual de la vida cotidiana.

Supongamos que un conductor de un vehículo dotado de un sistema de control de velocidad de crucero abandona una zona urbana, con un límite de velocidad de 50 km/h, para entrar en una vía de velocidad limitada a 120 km/h y pulsa el botón de ajuste de velocidad para colocarlo en 120km/h. El sistema de control de velocidad debe hacer un ajuste de la aceleración del motor para conseguir pasar de la velocidad inicial a la final de forma suave y progresiva, siguiendo una curva similar a la indicada en la figura 3.7.

Un cambio brusco no es deseado, ni por el bien del vehículo, pues podría provocar daños materiales o importantes sobrecostes en el diseño, ni por el de las personas, porque la sensación de incomodidad sería enorme en los cambios de consigna.

La trayectoria suave de la salida se consigue mediante el uso de un modelo de referencia que recibe como entrada el valor deseado o consigna para la variable del proceso y genera como salida una trayectoria de referencia con las características deseadas. Un caso típico de modelo de referencia puede describirse como:

$$y_r(k+1) = \alpha_1 y_r(k) + \alpha_2 y_r(k-1) + \beta_1 y_{sp}(k) + \beta_2 y_{sp}(k-1) \quad (3.32)$$

con:

$$y_r(0) = y_0; y_r(-1) = y_1;$$

donde y_r e y_s representan la salida de referencia y la consigna respectivamente.

Con esta ecuación puede obtenerse toda la trayectoria para cada uno de los instantes de tiempo $k = 0, 1, \dots$ a partir de unos valores iniciales (y_0, y_1) y en función de los valores dados para la consigna.

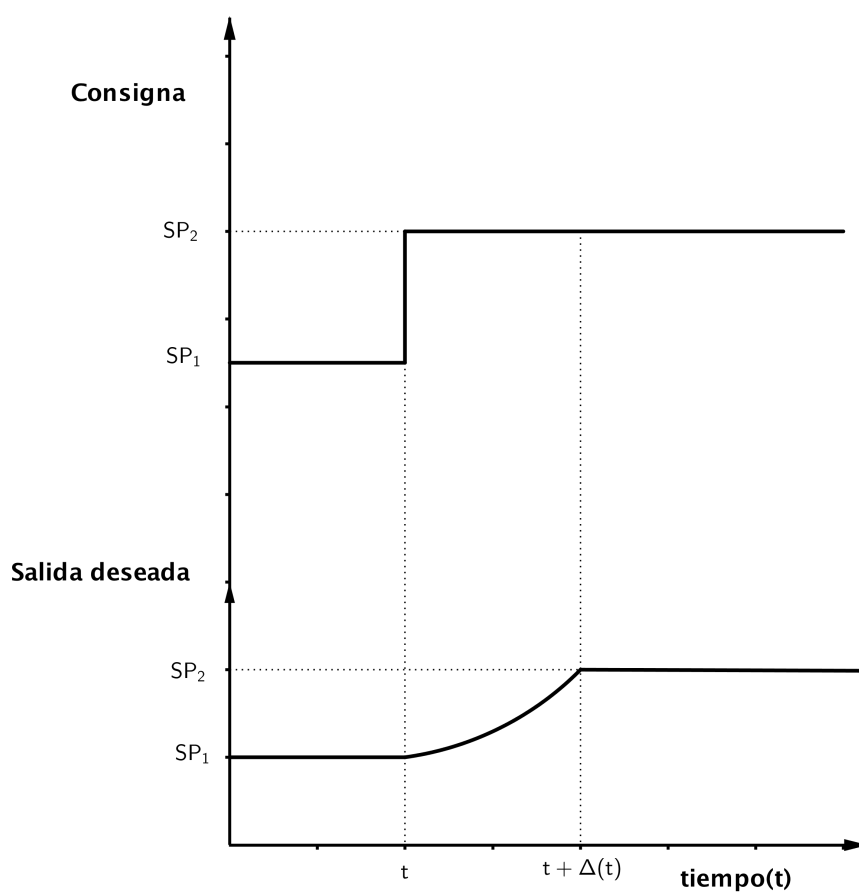


Figura 3.7: Modelo de referencia.

Continuando con el coche anterior, y suponiendo que ahora se pase de autopista a ciudad, es deseable, de nuevo, que la transición entre la velocidad de autopista y urbana sea muy suave para evitar deceleraciones incómodas para los pasajeros. Se puede determinar la trayectoria deseada para el decremento de velocidad asumiendo que en cada intervalo de tiempo se va a reducir un 20 % la velocidad inicial. El modelo de referencia sería entonces:

$$y_r(k+1) = 0,8y_r(k), \quad k = 0, 1, \dots \quad (3.33)$$

$y_r(0) = 1$ Gráficamente esta curva se representa en la figura 3.8.

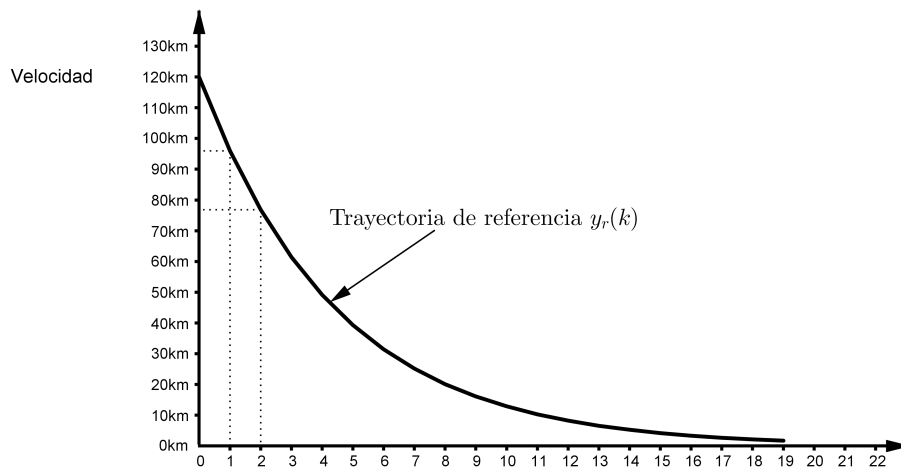


Figura 3.8: Trayectoria de referencia deseada.

Se inicia la deceleración como estaba previsto, pero entre el instante de control $t = 1$ y el instante de control $t = 2$, la carretera presenta una pendiente muy pronunciada y la velocidad, en lugar de reducirse, aumenta por el efecto de la gravedad sobre el vehículo. En lugar de alcanzar los 77km/h deseados en ese instante, la velocidad vuelve a subir hasta los 100km/h. Si se continúa con la idea de mantener la reducción de velocidad inicialmente prevista, la deceleración entre el instante $t = 2$ y el $t = 3$ sería el doble de la predicha, generando incomodidad para los viajeros. Puesto que la velocidad de desaceleración se ha elegido inicialmente teniendo en cuenta la naturaleza del proceso, parece lógico mantener la razón de decrecimiento de la velocidad que se fijó originalmente para generar la trayectoria deseada, pero partiendo del valor real en el instante $t = 2$. La trayectoria será ahora definida por la ecuación:

$$y_d(k+1) = 0,8y(k) \quad (3.34)$$

Como se observa en la figura 3.9 se genera una nueva trayectoria proyectada deseada con la salida calculada a partir del valor real medido de la salida del proceso en cada nuevo instante de control.

1. Los factores externos son condiciones variables que quedan fuera del control de la gestión de la compañía.
2. Los factores internos están referidos al grupo, la compañía, la fábrica, y las instalaciones que están fuera del control de la gestión de mantenimiento, pero dentro del control de la gestión de la compañía.

Objetivos de los indicadores.

La utilización de este tipo de indicadores posibilita que la gerencia defina objetivos y estrategias para mejorar desde un punto de vista económico, técnico y organizativo. Estos objetivos serán las consignas, los valores de destino de las TDP que el modelo calculará.

Para seleccionar los más adecuados a la hora de ayudar al gestor en el control de una situación gerencial, vamos a analizar qué tipo de información se necesita en cada nivel de decisión de la empresa.

Indicadores pertinentes.

Un indicador será pertinente cuando su valor o su evaluación, está en correlación con la evaluación del parámetro de rendimiento a medir. Cuando esto ocurre, el indicador se convierte en una herramienta muy útil para la toma de decisiones.

En el apartado 4.4.4 se van a seleccionar los indicadores pertinentes para la aplicación en estudio. Serán aquellos que cumplen los siguientes requisitos:

1. Aportan información para la toma de decisiones sobre las acciones que se realizarán en futuros periodos de programación.
2. Los datos requeridos para su cálculo están disponibles en cada instante k de programación.

Capítulo 4

Desarrollo del Modelo de Decisión.

4.1. Introducción

En la aplicación práctica, vamos a estudiar un sistema simplificado del mundo real.

Según la definición dada por REE [dE09] un sistema eléctrico *”es el conjunto de elementos que operan de forma coordinada en un determinado territorio para satisfacer la demanda de energía eléctrica de los consumidores”*. Los sistemas eléctricos están constituidos por los siguientes elementos: a) Centrales de generación. b) Líneas de transporte. c) Estaciones transformadoras (Subestaciones). d) Líneas de distribución de media y baja tensión. e) Elementos de control y auxiliares. Tal como se apuntó en los capítulos anteriores, el sistema eléctrico conforma una estructura compleja muy similar a un organismo vivo, pues los procesos biológicos que definen la vida: (a) Evolución b) Función c) Organización d) Estructura) son válidos para explicar el funcionamiento del mismo [CG03]. Las partes de un organismo tienen una relación de interdependencia en la que se necesita de la concurrencia adaptada de todas y cada una de las partes y cada parte necesita que todas las demás funcionen perfectamente para obtener el mejor resultado.

Las redes eléctricas se diferencian de muchos otros sistemas industriales en factores como:

- Tamaño: tanto en extensión geográfica como en número de componentes;
- Dispersión geográfica: Los elementos que la componen están distribuidos por la geografía.
- Edad: La edad de los componentes de un sistema es una de las variables típicas cuando se toman decisiones sobre su mantenimiento. En un sistema de distribución aparecen factores como: 1. distintas etapas constructivas, 2. diferente ciclo de vida en función de las características propias de diseño, 3. sustituciones parciales por fallos, reformas o ampliaciones, . . . que dificultan su determinación y que restan utilidad a los modelos exactos.

La tendencia clara en el sector de la distribución es evolucionar hacia el mantenimiento basado en la condición que permita fijar un nivel de fiabilidad para los equipos y sistemas. Sin embargo, su implantación todavía es incipiente, estando orientada a equipos concretos como los transformadores o generadores, cuya importancia en la red, por coste y función, justifica el esfuerzo de conseguir identificar sus modos de fallo para tratar de adelantarse al mismo, pues un fallo incontrolado se traduce en una indisponibilidad con repercusión temporal y económica sustancial ([HJ01],[PTG⁺92]).

Sobre el resto de los elementos, cuyos fallos son relativamente menos importantes, debido a que su afección económica o funcional sobre el sistema global tiene poco peso de forma individual, los principios de este tipo han calado hondo en los departamentos de mantenimiento; sin embargo, su aplicación formal de manera rigurosa exige un esfuerzo desproporcionado con respecto a los resultados que cabe esperar.

El mantenimiento basado en la condición exige recursos que crecen proporcionalmente con la cantidad de condiciones que se pretende evaluar. Es en esta partida, que también forma parte de los costes fijos del mantenimiento, donde las empresas distribuidoras tienen más grados de libertad a la hora de fijar sus objetivos ([SFU08],[FHCZ11a],[GMV12a])

La tecnología disponible a día de hoy, pone al alcance de las empresas la monitorización de parámetros impensables hace tan solo 20 años atrás. Sin embargo, la economía de escala que hay que aplicar a la hora de monitorizar determinados parámetros de ciertos elementos marca diferencias entre empresas. Simplificando un poco, para cada uno de los elementos del abanico de ellos que componen la red, existen diferentes parámetros monitorizables. Cada parámetro o conjunto de ellos puede predecir, con las herramientas adecuadas, una tipología de producción de fallo. Los métodos de desencadenamiento del fallo pueden tener diferente incidencia en las redes por diversos factores ¹. Por lo tanto, las empresas van a otorgar más importancia a realizar el despliegue de un programa de monitorización de parámetros en ciertos elementos cuyo fallo es más preocupante en su red.

Tras la decisión inicial acerca de qué parámetros hay que monitorizar para cada elemento, la segunda decisión que diferencia a las empresas, sería qué elementos se monitorizan y la tecnología empleada para ello. Cada empresa puede tomar diferentes criterios de priorización, tales como:

- repercusión para la calidad del servicio en caso de fallo del elemento,
- coste de la reparación en caso de fallo,
- riesgo para otras instalaciones,
- costes de instalación y mantenimiento,
- disponibilidad de las instalaciones para realizar el montaje.

¹ como la climatología, la contaminación, la disposición geográfica, los criterios constructivos, etc.

Finalmente, el tercer elemento de decisión que va provocar diferencias, será el plazo temporal que cada empresa asigne a un plan de monitorización de los parámetros definidos en los elementos seleccionados².

Los recursos fijos que la empresa distribuidora pone a disposición de los responsables del mantenimiento dependerán del estado de salud económica de la empresa. Los recursos variables están condicionados por la salud técnica de las instalaciones. La suma de ambas cantidades determinará el tipo de mantenimiento y la cantidad de tareas que se podrán acometer.

Al inicio de cada ejercicio presupuestario, un responsable de mantenimiento tiene que decidir qué tareas puede realizar para mejorar el funcionamiento presente y futuro de la instalación, garantizando que se cumplen los objetivos de mantener ante todo la seguridad de las personas y tratar de mejorar los resultados del funcionamiento del sistema reduciendo todos los elementos de disfunción que estén a su alcance: 1. pérdidas, 2. interrupciones, 3. desgastes y fatigas, 4. roturas,...

Dentro de cada ejercicio presupuestario, debe gestionar sus recursos para atender las tareas planificadas de tipo recurrente y las no planificadas de tipo ocasional que van surgiendo, priorizando unas y laminando en el tiempo otras en función de la repercusión esperada en el objetivo.

La labor de seleccionar el tipo de tareas que se realizarán a cada elemento de la red y los elementos sobre los que se actuará, es el típico problema de selección de una cartera de proyectos.

4.2. Descripción de un caso práctico de toma de decisión.

El problema que se estudia en este apartado de aplicación práctica es muy común en el mundo del mantenimiento industrial real. Prácticamente todos los productos están fabricados de acuerdo a métodos de garantía de calidad que cumplen patrones estadísticos. Existe una tasa, casi siempre controlada, de fallo de fabricación y otra de fallos de diseño. Estas tasas de fallo se superponen al envejecimiento natural de los materiales del producto para añadir un amplio abanico de causas de fallo difíciles de predecir. En la actualidad, los estándares de calidad de todas las compañías contemplan acciones de seguimiento, tanto desde el punto de vista de los fabricantes como desde el punto de vista de los usuarios intermediarios o finales.

²Una empresa puede monitorizar de forma exhaustiva el estado de la red de tierras de todos sus centros de transformación, para garantizar la tensión de paso y contacto, porque así se lo aconseja su experiencia para evitar una tasa de fallo elevada en ese elemento, o puede simplemente hacer una medición de las tensiones indicadas y actuar cuando el valor obtenido no cumpla la normativa. La cantidad de recursos empleados en el primer caso es mucho mayor.

Cuando un fabricante detecta, por alguno de sus procedimientos de calidad, que un determinado producto tiene una tasa de fallo superior a la planificada en origen tiene que tomar medidas o su reputación se verá perjudicada. Las medidas incluirán al menos las siguientes:

1. Detección del origen del problema para evitar que se fabriquen más productos con defectos.
2. Comunicación a los clientes para que puedan tomar medidas preventivas
3. Colaboración con los clientes para mitigar los efectos de los daños causados.

Del mismo modo, cuando un usuario final detecta que un determinado equipamiento falla antes de lo esperado, o por motivos diferentes, también tiene que tomar medidas, incluyendo la participación del fabricante en el proceso de solución del problema.

Sea cual sea el camino de detección del problema, habrá que tomar decisiones que conduzcan al restablecimiento de las condiciones de funcionamiento del sistema hasta un estado asimilable a nuevo.

Supongamos que en una red de distribución de energía existe una población de equipos auxiliares de control. Esta población tiene las siguientes características:

- Se distribuye en varias áreas geográficas diferenciadas.
- La funcionalidad de cada equipo varía en función de varios estados posibles:
 - Activo. El equipo está instalado dentro del sistema y el correcto funcionamiento del mismo depende de su estado.
 - Respaldo. El equipo está instalado dentro del sistema. Sin embargo, su misión es secundaria y existe otro elemento que puede realizar su función en caso de indisponibilidad.
 - Repuesto. El equipo está en un almacén como repuesto para sustituir a otro elemento de las mismas características cuando se produzca un fallo del mismo.

La detección de un fallo en un equipo desencadena un proceso complejo de decisión. El primer paso siempre debe ser localizar la causa raíz del fallo para garantizar el empleo de los recursos en tareas eficaces para recuperar la salud del sistema. Las causas tienen efectos sobre las decisiones al condicionar:

1. El volumen de equipos afectados:
 - Individuales, afectando a un único equipo.
 - Generales, toda la población de equipos del mismo tipo sufre el daño.
2. La gravedad del problema para el equipo:
 - Reparable.

- No reparable.

El responsable de mantenimiento va a formarse una percepción sobre los resultados del fallo del equipo que excede al análisis de factores puramente matemáticos del análisis estadístico del defecto encontrado o comunicado por el fabricante.

Al mismo tiempo, debe valorar la afección que representará para el resto de las tareas la incorporación de la nueva, en forma de costes directos o indirectos o en forma de incremento del periodo de realización o finalización. Con estos datos el responsable de mantenimiento debe tomar una decisión que dé respuesta a la siguiente pregunta:

¿Cómo acometo esta tarea de manera que el resto de mis objetivos no se vea afectado?

Si hacemos la analogía Tarea de Mantenimiento = Proyecto habrá que responder a las siguientes cuestiones [Cas96]:

- Aceptación o no del proyecto considerado individualmente.
- Selección de un único proyecto de entre un conjunto de alternativas excluyentes.
- Selección de un subconjunto de alternativas dentro de un conjunto de proyectos aceptables debido a la existencia de restricciones activas en los recursos disponibles para acometer varios proyectos.

La reparación de un sistema, entendida como la restitución del sistema a un estado sano, involucra a los siguientes elementos:

- Recursos de sustitución. Son los estrictamente necesarios para realizar la sustitución de un equipo defectuoso por otro sano. Se mide normalmente en *Horas/Hombre* de trabajo
- Recursos de transporte. Son los empleados para trasladar los elementos, el sustituido y el sustituto, entre origen y destino: el sustituto desde la fábrica/almacén a la instalación y el sustituido desde la instalación al almacén/taller de reparación.
- Recursos de explotación. Son los necesarios para poner el sistema en un estado que permita realizar la reparación del elemento dañado. Puede ser necesario sacar de servicio un subconjunto amplio de elementos más allá del propio equipo en fallo.

La suma de los costes de los recursos empleados y del resto de costes indirectos componen el coste mínimo esperado para la tarea de sustitución. Además de la repercusión de esos costes en el presupuesto anual, el responsable de mantenimiento debe contar con la distribución temporal impuesta por el entorno. Es decir, incluso suponiendo que los recursos son ilimitados en su empresa distribuidora, el fabricante establece limitaciones por su proceso de fabricación para servir determinados volúmenes de equipos en un plazo dado; los transportistas emplean un tiempo mínimo de transporte en llegar desde la fábrica al almacén; los empleados utilizan unos tiempos en desplazarse hasta las instalaciones; las instalaciones tienen restricciones técnicas que hacen imposible disponer de todas ellas

simultáneamente; obligando, por tanto, a una determinada secuencia de actuación. La suma de estos tiempos supondrá la duración mínima esperada para la tarea de sustitución.

En la práctica, el responsable de mantenimiento de nuestro caso práctico, se verá obligado a responder secuencialmente a los tres tipos de problema. En primer lugar, tiene que decidir si el problema detectado le afecta lo suficiente como para iniciar una línea de acción (es aceptable la no existencia de solución como solución del problema y, por tanto, no se tomaría ninguna acción, dejando que la red evolucione). En segundo lugar, debe escoger entre un subconjunto de alternativas todas ellas aceptables, que se realizarán en un determinado espacio de tiempo. Finalmente, a la hora de la programación de las tareas se enfrentará al hecho de que las alternativas se convierten en excluyentes en cuanto se asignan los recursos para una unidad de tiempo laboral.

Se acepta normalmente en la práctica de la ingeniería que tareas de mantenimiento supuestamente idénticas, realizadas bajo similares condiciones, requieren diferentes lapsos de tiempo [Kne96b]. Las razones principales para estas variaciones se pueden clasificar en tres grupos:

- **Factores personales:** que representan la influencia de la habilidad, motivación, experiencia, actitud, capacidad física, vista, autodisciplina, formación, responsabilidad y otras características similares relacionadas con el personal implicado;
- **Factores condicionales:** que representan la influencia del entorno operativo y las consecuencias que ha producido el fallo en la condición física, forma, geometría y características similares del elemento o sistema sometido a mantenimiento;
- **Factores de entorno:** que reflejan la influencia de aspectos como temperatura, humedad, ruido, iluminación, vibración, momento del día, época del año, viento, etc. en el personal de mantenimiento durante la ejecución de la tarea de mantenimiento.

El tiempo empleado en realizar una tarea es solo uno de los factores que intervienen en la toma de decisiones y, como acabamos de exponer, está condicionado por múltiples factores.

En el planteamiento del problema, partimos de la hipótesis de unos pocos objetivos globales, como son asegurar el correcto funcionamiento del sistema y mejorar los procesos productivos. Sin embargo, puesto que la red es muy extensa, este objetivo se consigue por agregación de múltiples objetivos parciales cuya consecución garantiza el éxito del conjunto.

Puesto que nos encontramos con múltiples criterios que afectan a cada decisión y se persiguen múltiples objetivos, procede un enfoque multicriterio abordado desde la óptica de la programación multiobjetivo.

Dado que la red de distribución está viva, la misma pregunta se le va a presentar al decisor para distintas tareas en diferentes momentos. Cada día tendrá que atender nuevos temas,

sin abandonar los trabajos en curso, creando nexos de unión e interdependencias entre todos ellos, aunque en un inicio pudiesen haber sido tratados de manera independiente.

En el siguiente apartado se analizan los datos de partida necesarios y las herramientas matemáticas seleccionadas para ayudar al responsable de mantenimiento en la tarea de toma de decisiones en este tipo de cuestiones.

4.3. Representación del conocimiento del caso práctico.

4.3.1. Conceptos modelables del caso práctico.

En una empresa, el inventario de instalaciones, equipos, herramientas y materias primas es una necesidad primaria. En las empresas de distribución, tener claramente identificado cada equipo que compone sus instalaciones también es una necesidad legal.

Datos estáticos.

Las instalaciones, y los equipos asociados a las mismas, de una empresa de distribución eléctrica están recopilados habitualmente en bases de datos relacionales. Los datos que se recogen en ellas hacen referencia a:

- Datos de identificación: Códigos y referencias que permitan reconocerlo de forma unívoca y relacionarlo con otros elementos.
- Datos constructivos: Características propias del elemento, normalmente proporcionadas por el fabricante del mismo.
- Datos de interconexión: Definen cómo está conectado el elemento en cuestión con el resto del sistema.
- Datos de funcionalidad: Definen la función del elemento dentro del sistema.
- Datos topológicos: Datos que permiten ubicar el elemento dentro de un espacio geográfico.

Típicamente existirá una correspondencia entre la estructura de la base de datos y la estructura de la propia red de distribución representada por la figura 4.1. El mantenimiento de los datos de estas bases de datos permite conocer las características de fabricación de todos los elementos instalados en la red, así como su ubicación geográfica y topológica en la misma. Sin embargo, este tipo de bases de datos relacionales no permiten mantener datos dinámicos como pueden ser el estado de los equipos en un instante dado.

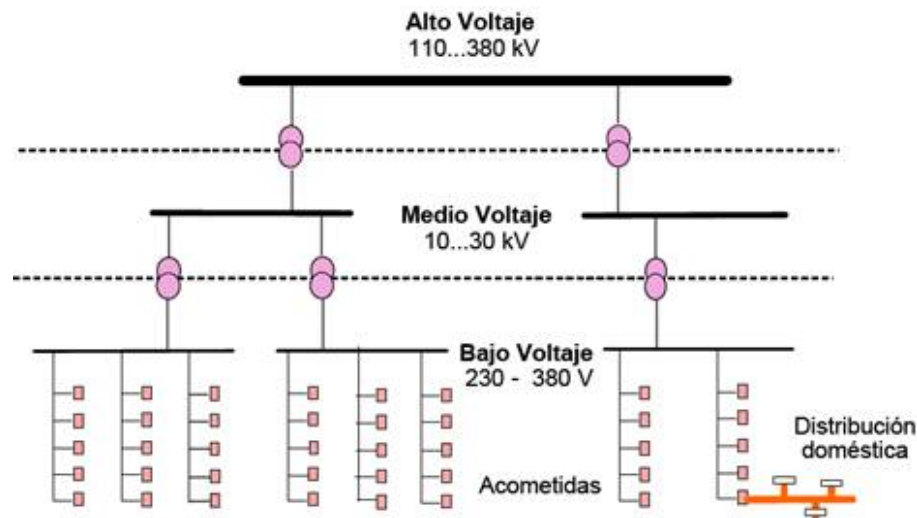


Figura 4.1: Componentes por niveles de tensión de una red de transporte y distribución eléctrica.

Datos de estado.

La mayoría de las instalaciones del sistema eléctrico no tienen incorporados sistemas de monitorización en tiempo real. Para conocer su estado es necesario recurrir al clásico sistema de muestreo periódico de determinados parámetros. El periodo máximo entre muestreos viene determinado reglamentariamente, pero cada empresa define su propia frecuencia en función de su política de mantenimiento.

Los parámetros monitorizados son heterogéneos, de la misma manera que el modo de adquirirlos, por lo que la forma de presentación resulta lógicamente muy variada. Para el tratamiento automatizado todos los datos deberían estar en formato digital, sin embargo, las fuentes de datos son tan dispares como las representadas en la figura 4.2, incluyendo comunicaciones habladas que habrá que traducir a alguno de los formatos siguientes:

- Informes: Documentos en formato texto, redactados por una persona recopilando percepciones y/o datos de mediciones recopiladas manualmente, independientemente de los medios utilizados para su realización.
- Bases de datos: Datos estructurados en forma de registros conteniendo equipos y sus parámetros.
- Ficheros de mediciones: Son ficheros proporcionados por algún equipo informático que recopila la información captada por sensores electrónicos. Estos datos se archivan en un formato que permite su posterior tratamiento. El formato puede ser abierto, cuando responde a una Norma aceptada por el fabricante del equipo de toma de datos, o propietario, cuando es necesario utilizar el código informático facilitado por el fabricante del equipo.



Se consideran tales los incumplimientos de las medidas de seguridad que pueden provocar el desencadenamiento de los peligros que se pretenden evitar con tales medidas, en relación con:

- a) Reducción de distancias de seguridad o del grado de protección a la penetración de cuerpos extraños aplicable.
- b) Reducción de distancias de aislamiento.
- c) Degradación importante o defecto en el aislamiento.
- d) Falta de continuidad del circuito de tierra.
- e) Tensiones de paso y contacto superiores a los valores límites admisibles.

4.2 Defecto Grave

Es el que no supone un riesgo grave e inminente para la seguridad de las personas o de los bienes, pero puede serlo al originarse un fallo en la instalación. También se incluye dentro de esta clasificación, el defecto que pueda reducir de modo sustancial la capacidad de utilización de la instalación eléctrica.

Dentro de este grupo, y con carácter no exhaustivo, se consideran los siguientes defectos graves:

- a) Falta de conexiones equipotenciales, cuando éstas fueran requeridas.
- b) Degradación del aislamiento.
- c) Falta de protección adecuada contra cortocircuitos y sobrecargas en los materiales, en función de la intensidad máxima admisible en los mismos, de acuerdo con sus características y condiciones de instalación.
- d) Defectos en la conexión de los conductores de protección a las masas, cuando estas conexiones fueran preceptivas.
- e) Sección insuficiente de los cables y circuitos de tierras.
- f) Existencia de partes o puntos de la instalación cuya defectuosa ejecución o mantenimiento pudiera ser origen de averías o daños.
- g) Naturaleza o características no adecuadas de los equipos utilizados.
- h) Empleo de equipos y materiales que no se ajusten a las especificaciones aplicables.
- i) Ampliaciones o modificaciones de una instalación que no se hubieran tramitado según lo establecido en la ITC-RAT 22.
- j) No coincidencia entre las condiciones reales de la instalación con las condiciones de cálculo del proyecto.
- k) Ausencia de las declaraciones de conformidad de los equipos, o falta de veracidad de las mismas.
- l) La sucesiva reiteración o acumulación de defectos leves que por efecto de su combinación o acumulación supongan un peligro para la seguridad de las personas o de los bienes.

4.3 Defecto Leve.

Es todo aquel que no supone peligro para las personas o los bienes, no perturba el funcionamiento de la instalación y en el que la desviación respecto de lo reglamentado no tiene valor significativo para el uso efectivo o el funcionamiento de la instalación.

Figura 4.4: Recopilación de defectos reglamentarios. (Imagen tomada de BOE RD337/2014, de 9 de mayo).

$$\begin{aligned} &(\text{Número de Instalaciones}) \times (\text{Número de elementos}) \times (\text{Número de parámetros de identificación}) \times \\ &(\text{Número de parámetros de localización}) \times (\text{Número de parámetros de estado}) \end{aligned} \quad (4.1)$$

Estos datos se generan para cada instante de muestreo. Ciertos datos serán estables durante todo el periodo, pero otros no. Así, si un elemento está en un estado diferente al sano, será sometido a reparación durante el periodo. La reparación puede ser de diferentes tipos en función de las posibilidades. Mientras dure este estado, el sistema no estará sano, pero puede estar operativo.

Los estados son de naturaleza evolutiva. Hay un envejecimiento natural de todos los equipos e instalaciones y por encima de esto existen sucesos disruptivos que dañan a los equipos.

Histórico de estados.

Los datos de cada estado para cada elemento de la red, se archivan para el tratamiento estadístico. El archivo de información histórica permite aplicar técnicas de minería de datos. Junto con los datos de estado, es habitual que exista algún tipo de repositorio de información acerca de las acciones tomadas ante determinados estados de un elemento. Serían los registros de averías y trabajos.

4.3.2. Representación de los conceptos.

Definición de los requerimientos para el caso práctico.

El primer objetivo de este estudio es construir un entorno de trabajo que permita responder a las preguntas:

- ¿Cómo acometo la tarea de manera que el resto de objetivos no quede afectado?
- Aceptación o no del proyecto considerado individualmente: ¿Acepto el proyecto ahora?
- Selección de un subconjunto de alternativas dentro de un conjunto de proyectos aceptables: ¿Qué tareas acometo en este periodo de programación?
- Selección de un único proyecto de entre un conjunto de alternativas excluyentes: ¿Qué tareas puedo acometer con los recursos disponibles?

La respuesta de todas ellas requiere poder realizar consultas sobre las fuentes de información comentadas en el apartado anterior. Esto es lo que hacen habitualmente los responsables de la actividad de mantenimiento. Para tratar de ayudar en el proceso de interpreta-

ción de los datos en primera instancia y de elaborar opciones de decisión en las siguientes etapas, resulta imprescindible contar con la colaboración de sistemas informáticos.

Los algoritmos de selección de alternativas sólo pueden funcionar si los datos responden a patrones. Estos patrones se definen a partir de un modelo conceptual.

Según [W⁺03] el desarrollo de modelos conceptuales significa especificar lo siguiente:

- Componentes del sistema a estudiar u objetos esenciales del mismo.
- Las relaciones reconocibles entre los objetos.
- ¿Qué tipo de cambios en los objetos o sus relaciones afectan el funcionamiento del sistema? ¿De qué manera?
- Objetivos y métodos de investigación.

Una característica muy importante de los modelos conceptuales es que proporcionan las herramientas conceptuales y metodológicas para la formulación de hipótesis y teorías, ya que establecen las condiciones previas para la formulación de teorías.

Los modelos conceptuales pueden mapear la realidad, orientar la investigación y sistematizar el conocimiento, mediante la integración y proposición de hipótesis. El modelo de realidad que nos interesa en este capítulo, está orientado a ayudar a resolver los problemas, facilitando búsquedas estructuradas según el pensamiento humano. La estructura de búsqueda de información en un conjunto de datos se compone de las etapas mostradas en la figura 4.5:

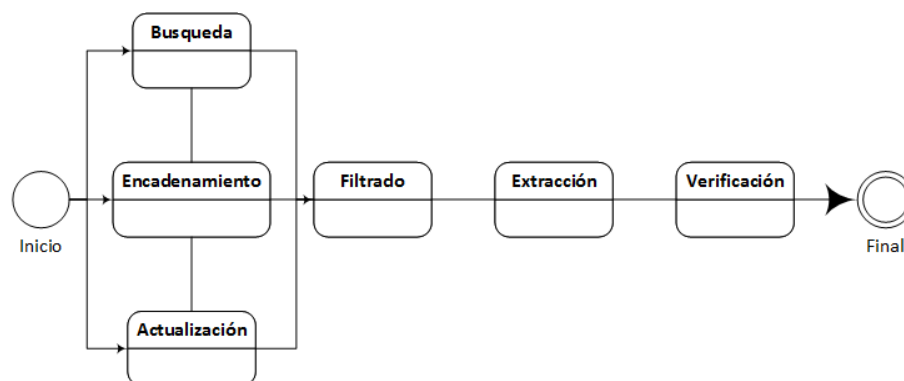


Figura 4.5: Estructura de búsqueda de información dentro de datos heterogéneos.

- Inicio. Recopilar los medios o recursos utilizados por el usuario para comenzar la búsqueda de información.
- Encadenamiento. Enlazar ideas o conceptos relacionados entre sí del mismo modo que se hace al seguir enlaces o referencias de documentos cuyo contenido se sabe relevante y relacionado con la búsqueda.
- Búsqueda. Búsqueda semiestructurada por contenidos.

- Filtrado. Filtrado de los datos obtenidos a partir de las diferencias conocidas de las fuentes de información.
- Actualización. Actualización de los datos de manera periódica.
- Extracción. Identificar selectivamente material relevante en una fuente de información.
- Verificación. Comprobación de la exactitud de la información obtenida mediante contrastación con otras fuentes.
- Final. Búsqueda final destinada a garantizar que no queden cabos sueltos.

En la búsqueda de la información que nos interesa, lo importante es la información relacionada con las tareas. Todo trabajo se compone de tareas. Cada tarea se puede descomponer en niveles de subtareas progresivamente más pequeñas. Se define una tarea a partir de un comienzo y un final reconocibles, conteniendo información sobre los objetivos y directrices relativas a las medidas que habrá que tomar y los objetivos previstos. Visto de esta manera, tanto una tarea grande o cualquiera de sus subtareas (obviamente más simples) se pueden considerar como una tarea. Esta relatividad en la definición es necesaria con el fin de analizar las tareas de los diferentes niveles de complejidad [W⁺03].

Tipos de información necesarios en las tareas:

- Información del problema: Describe la estructura, propiedades y requerimientos del problema. En el caso concreto que nos ocupa, será la información relativa al tipo de trabajo que se necesita realizar sobre un equipo y que resultados se esperan.
- Información de dominio: Se compone de hechos conocidos, conceptos, leyes y teorías en el dominio del problema. En nuestro caso el dominio esta compuesto por:
 - La información sobre el dominio específico que proporciona información sobre qué factores afectan a los trabajos.
 - La información sobre los elementos o entidades (instalaciones y equipos) que componen el subsistema eléctrico que hay que mantener.
 - La información de los trabajos que se pueden realizar sobre un determinado equipo, incluyendo toda la información necesaria para realizarlo
- Información de soluciones a otros problemas en el pasado: El método de análisis del problema constituye la heurística de decisión que está en manos del responsable de mantenimiento y que se desarrolla más adelante.

Desarrollo del modelo adaptado para la aplicación.

Con todo lo expuesto, se construye el modelo conceptual requerido. Es un modelo basado en tres ontologías.

Ontología de Dominio. Contiene información sobre los factores de entorno que afectan a los trabajos Incorpora la información CBR expuesta en el apartado 3.5.3[NDHMTK12]. En la figura 4.6 se representan las clases de la ontología de dominio desarrollada para analizar el dominio: los fallos, sus causas y las soluciones.

Ontología de Entidades. Contiene la información sobre las instalaciones y equipos que componen el sistema en estudio En la figura 4.7 se representan las clases de la ontología de entidades que componen la base física de los equipos objeto de los fallos y trabajos de mantenimiento.

Ontología de Trabajos. Contiene la información de la tipología de trabajos y tareas que se pueden realizar sobre un determinado equipo, incluyendo toda la información necesaria para realizarlo. En la figura 4.8 se representan las clases de la ontología de los trabajos de mantenimiento sobre instalaciones.

Razonamiento basado en ontologías. La construcción de un razonamiento basado en ontologías requiere recuperar datos de fuentes diversas para que un buscador pueda elaborar su propio conocimiento a partir de dichos datos. Este proceso se representa en la figura 4.9.

Intervienen los siguientes componentes:

- Fuentes de datos. En el apartado 4.3.1 se exponen las fuentes de los diferentes datos que son necesarios: 1. datos estáticos, 2. datos de estado, 3. históricos de estado.
- Buscador de datos. Programa informático que extrae los datos de los diferentes formatos empleados para el archivado: Bases de Datos, Informes de texto, Hojas de Cálculo, ... y los formatea siguiendo el patrón de conceptos del mapa conceptual.
- Ontologías Los almacenes de los datos conceptuales.
 - Ontología de Dominio
 - Ontología de Entidades
 - Ontología de Trabajos
- Procesador de Consultas. Realiza las búsquedas sobre las ontologías para presentar al usuario los resultados obtenidos

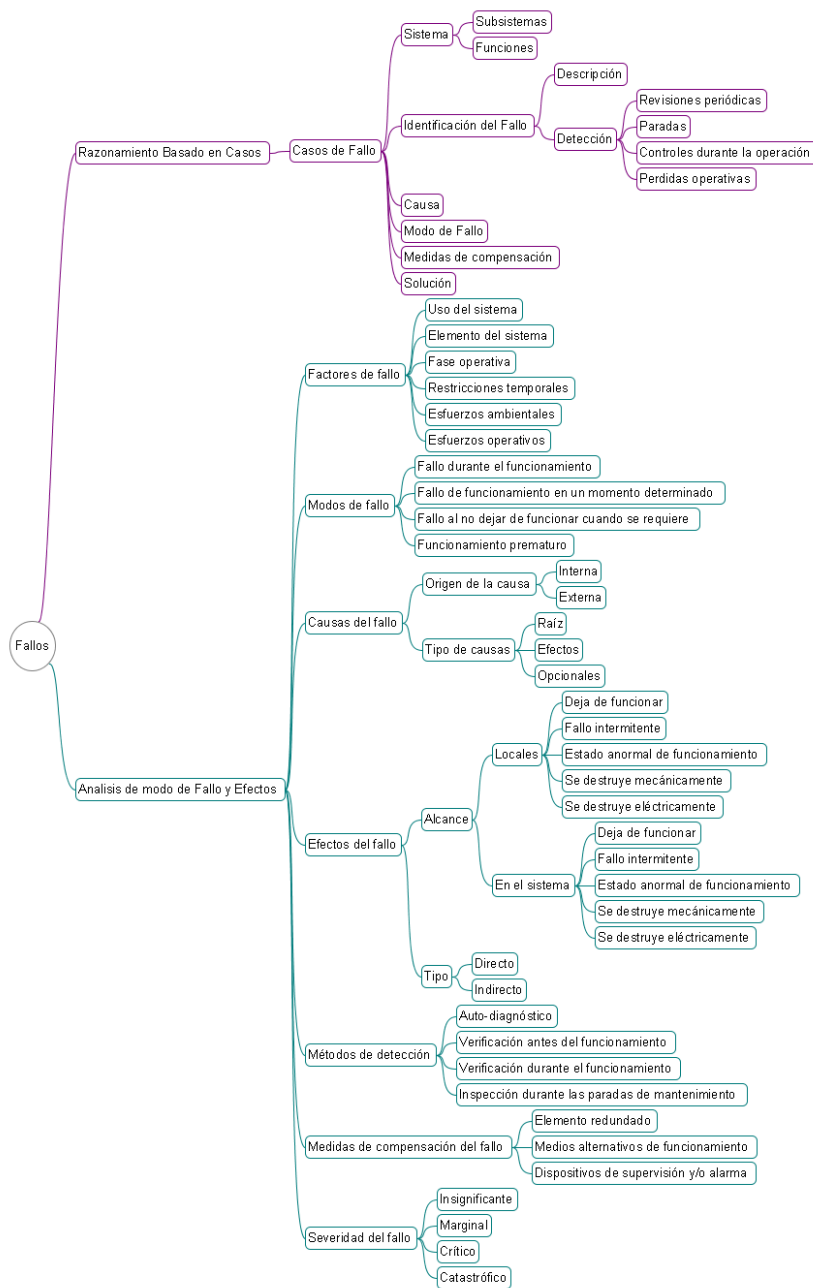


Figura 4.6: Clases de la ontología de dominio para el estudio de casos de fallos en instalaciones eléctricas.

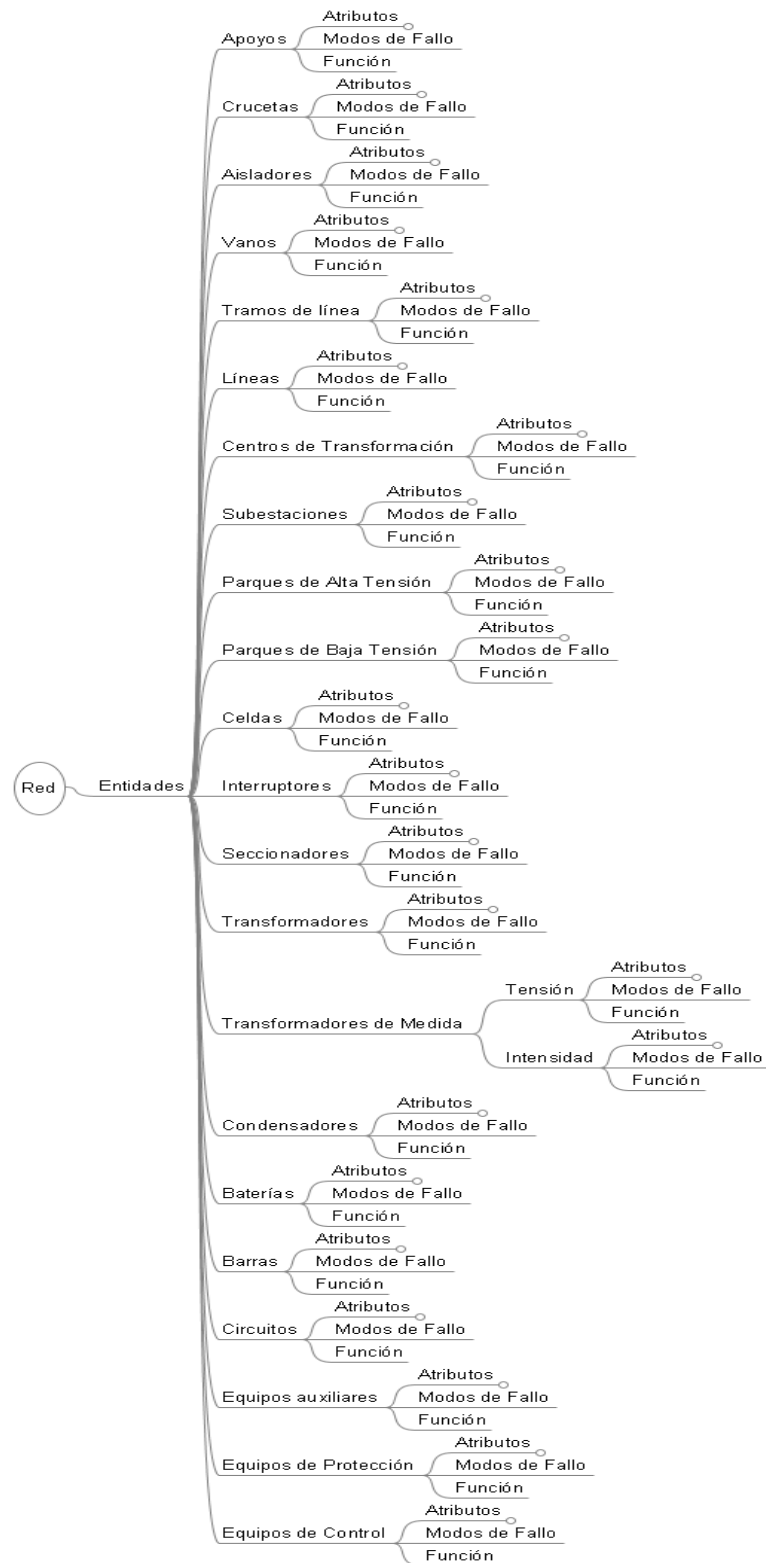


Figura 4.7: Clases de la ontología de las entidades que componen un sistema eléctrico

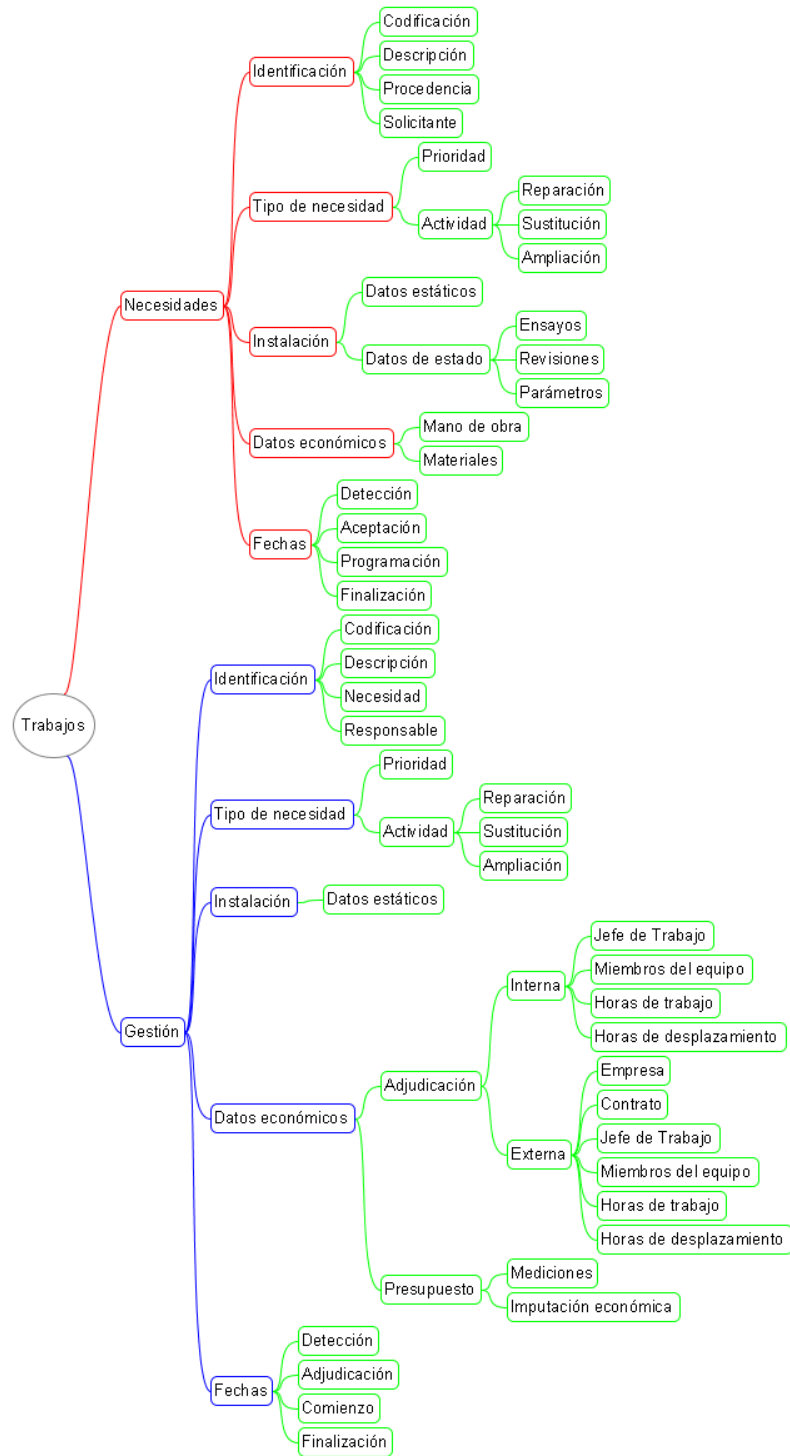


Figura 4.8: Clases de la ontología de los trabajos sobre instalaciones de un sistema eléctrico

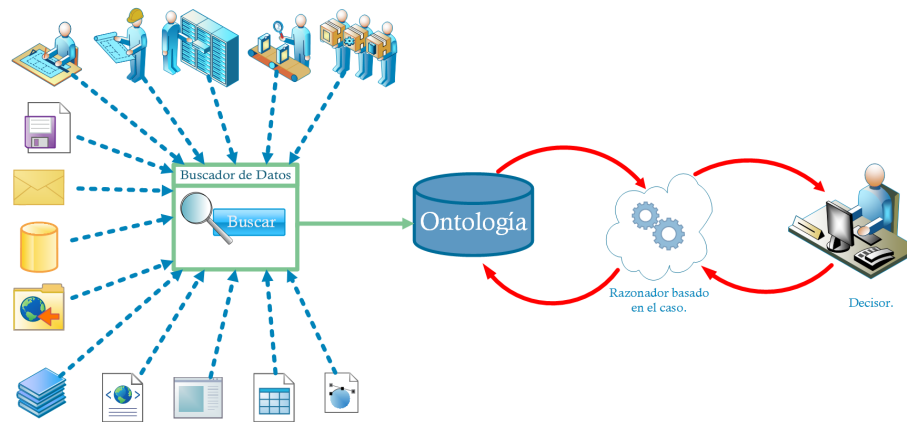


Figura 4.9: Representación de la arquitectura del modelo de datos de conocimiento.

Sobre este entorno de conocimiento es posible aplicar los algoritmos de solución.

La toma de decisiones y las ontologías.

Una vez definidos las características de entidades, trabajos y contexto, es necesario identificar las relaciones entre ellos de modo que sea posible plantear una función de decisión ajustada a las necesidades específicas del decisor.

Puesto que una ontología típicamente incluye una descripción jerárquica de los conceptos importantes en el dominio y una representación de las propiedades críticas de cada concepto por medio de un mecanismo de valores atributo, es relativamente sencillo utilizar esta estructura en árbol como base de un método jerárquico de decisión multicriterio.

Las estructuras jerárquicas son una de las mejores maneras de hacer frente a problemas complejos [For90]. Cuando hay que tomar una decisión sobre un problema complejo, al dividirlo en varios elementos jerárquicos se pueden realizar evaluaciones simples sobre cada elemento, para posteriormente, por agregación ponderada, aportar soluciones válidas para el problema complejo. La selección de los trabajos a realizar sobre un conjunto de instalaciones es un caso complejo del problema de selección de proyectos.

El planteamiento de estructuras ontológicas permite abordar el problema de una manera sistemática. Para cada trabajo en cada instalación se obtiene el árbol de características que lo definen [NDHMTK12]. Puesto que los modelos de trabajos e instalaciones contemplan tanto las características propias como las influencias del entorno, la comparación de árboles permitiría obtener una clasificación ordenada de la cartera de trabajos. Sin embargo, una lista priorizada de las necesidades no resulta especialmente útil a la hora de programar trabajos de mantenimiento. Es necesario dotar al proceso de un mecanismo dinámico que identifique los recursos disponibles para acometer dichos trabajos en el periodo de planificación considerado. En ese mecanismo se incorporarán las restricciones del modelo que estarán debidas a:

- Los equipos de trabajo.
- Los condicionantes geográficos.
- Las interacciones entre trabajos.
- Las interacciones entre instalaciones.

Pero también habrá que añadir las oportunidades, pues pueden producir ahorros muy importantes de recursos siempre escasos. El orden de prioridad de determinados trabajos se modificará:

- Cuando coincidan instalaciones cercanas.
- Cuando haya que completar periodos de programación.
- Cuando haya interacción de trabajos.

El uso de ontologías permite, además, superar una de las mayores limitaciones a la que se enfrentan los expertos humanos: las informaciones más recientes se imponen a las más antiguas, afectando al enfoque que se le da a los problemas al obviar ciertos datos que pueden resultar relevantes [Cow01]. Para determinar las variables que se tienen en cuenta en las ontologías se utiliza un método de selección basado en entrevistas semi-estructuradas y grupos focales con gestores dedicados al mantenimiento de instalaciones eléctricas [Sof02].

4.4. Selección de tareas e incorporación en programación: Herramienta de Ayuda a la decisión.

Sobre la base de conocimiento se aplican los modelos matemáticos explicados en el capítulo 2 para construir un modelo teórico de tres etapas con aplicaciones prácticas como herramienta de ayuda a la decisión.

4.4.1. Aceptación o no del proyecto considerado individualmente.

Este problema se resuelve utilizando las técnicas de satisfacibilidad booleana (SAT). Recordemos que el problema de satisfacibilidad (SAT) se define [GPFW99a]:

Sean las variables booleanas x_1, x_2, \dots, x_n con las cuales se pueden conformar m cláusulas C_1, C_2, \dots, C_m , de modo que cada cláusula es una disyunción de una o más variables x_i :

$$C_i = x_1 \vee x_2 \vee \dots \vee x_k = \bigvee_{i=1}^k x_i \quad (4.2)$$

El objetivo del problema es determinar si existe una combinación de valores de las variables que convierta en verdadera (sea satisfacible) la siguiente fórmula, denominada Fórmula Normal Conjuntiva (Conjunctive Normal Form, abreviado CNF):

$$C_1 \wedge C_2 \wedge \dots \wedge C_m \quad (4.3)$$

donde \wedge representa la conjunción lógica.

Factores y variables clave del sistema.

Para medir las variables de un sistema sobre el que se realizan operaciones de mantenimiento, cuyo rendimiento y eficacia se quiere evaluar, vamos a utilizar los indicadores clave proporcionados por la norma UNE15341 sobre Indicadores clave de rendimiento del mantenimiento. Uno de los objetivos de esta norma consiste en proporcionar los Indicadores Clave de Rendimiento del Mantenimiento para apoyar a la gestión en el empleo de los activos técnicos de una manera competitiva. En la misma, se proponen las siguientes utilidades:

1. Medir el estado. La información del estado de un sistema es un factor importante, pues permite establecer cuando es necesario realizar acciones de control.
2. Realizar comparaciones (referencias internas y externas). Las comparaciones son especialmente útiles cuando el objetivo es establecer acciones de mejora. En la planificación a corto plazo de tareas, su aportación no resulta significativa como norma general.
3. Realizar diagnósticos (análisis de fuerzas y debilidades). El diagnóstico por índices requiere unos plazos de adquisición de datos elevados. Esta herramienta aporta mayor utilidad para la planificación a medio-largo plazo que para el gestor de trabajos a corto-medio plazo.
4. Identificar objetivos y definir metas a alcanzar. Esta utilidad resulta imprescindible en cualquier fase de la gestión empresarial. Sus valores tendrán que ser ajustados según el tipo de gestión a realizar.
5. Planificar acciones de mejoras. Cuando se dispone de los datos de desvío es posible realizar acciones de corrección de la trayectoria. Este concepto es muy importante en nuestro modelo.
6. Medir los cambios de manera continua en el tiempo. Disponer de los datos y sus históricos es muy importante para controlar la evolución de las variables.

Todas ellas son interesantes para cualquier gestor de trabajos de mantenimiento en diversos aspectos de su actividad. Sin embargo, para el modelo de toma de decisiones sobre los

trabajos requeridos en un periodo de planificación y sobre una instalación o conjunto de ellas, las siguientes son las más importantes:

1. Identificar objetivos y definir metas a alcanzar. Fase imprescindible y necesaria que condiciona cualquier decisión. En el caso de las instalaciones eléctricas habrá objetivos impuestos reglamentariamente además de los empresariales habituales.
2. Medir los cambios de manera continua en el tiempo. Esta medición de cambios incorpora la medición de estado y las comparaciones, y permite calcular los errores de salida de las variables que nuestro modelo va a controlar.
3. Planificar acciones de mejoras. En línea con la anterior, las acciones de mejora serán las acciones de control del modelo.

Con los indicadores propuestos por la norma es posible medir el rendimiento del mantenimiento en el marco de los factores que influyen en el mismo, tales como los aspectos económicos, técnicos y organizativos. Se definen los siguientes conceptos:

- **Indicador:** Característica (o conjunto de características) de un fenómeno medido, de acuerdo con una fórmula dada, que evalúa la evolución. En este trabajo se asimila este concepto a la salida del proceso en un instante k : $u(k)$.
- **Cuadro de mando:** Conjunto de indicadores asociados, consistentes y complementarios, que proporcionan información sintética y global. Es el vector U de salidas del proceso que se quieren controlar.

Como se expuso en el apartado 3.6.2 , necesitamos una medida del rendimiento del control del proceso. El objeto de la norma UNE15341 es precisamente dotar de herramientas normalizadas para medir ese rendimiento definiéndolo así: *"El Rendimiento del Mantenimiento es el resultado de la utilización activa de recursos para conservar un bien, o para restaurarlo hasta un estado en el que pueda seguir realizando la función que del mismo se requiere. Esto se puede expresar como un resultado alcanzado o esperado"*.

El Rendimiento del Mantenimiento depende de factores tanto externos como internos, tales como:

1. el lugar, 2. la cultura, 3. los procesos de transformación y servicio, 4. el tamaño, 5. el régimen de utilización y 6. la antigüedad; y se consigue mediante la implantación de actividades de mantenimiento correctivo, preventivo y de mejora, aplicando mano de obra, información, materiales, metodologías organizativas, herramientas y técnicas operativas.

Indicadores de mantenimiento. La norma 15341 estructura el sistema de indicadores clave de rendimiento en tres grupos:

- indicadores económicos.
- indicadores técnicos.

- indicadores organizacionales.

Factores internos y externos. En la citada norma se distingue entre factores internos y externos:

1. Los factores externos son condiciones variables que quedan fuera del control de la gestión de la compañía.
2. Los factores internos están referidos al grupo, la compañía, la fábrica, y las instalaciones que están fuera del control de la gestión de mantenimiento, pero dentro del control de la gestión de la compañía.

La figura 4.10 recoge los indicadores y la clasificación de los factores que los influyen.

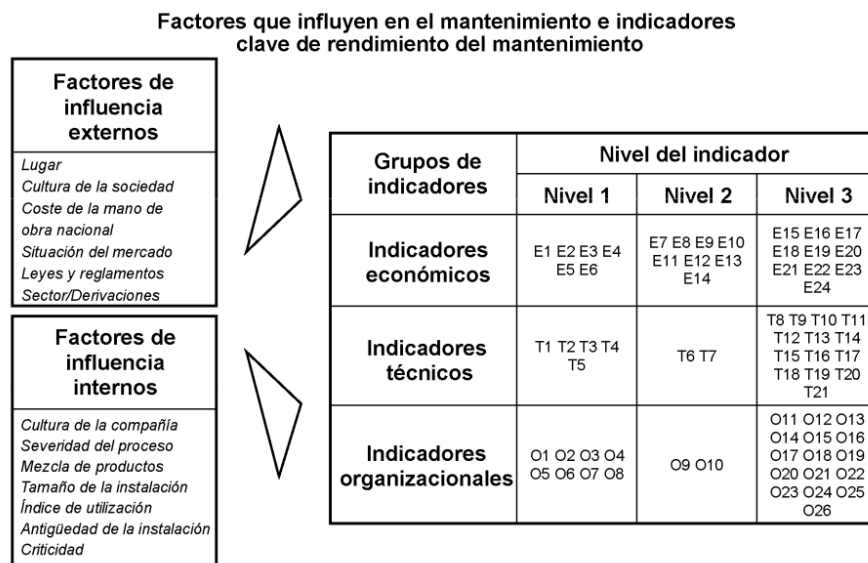


Figura 4.10: Factores que influyen en el mantenimiento e indicadores clave de rendimiento del mantenimiento. Imagen tomada de Norma UNE-EN 15341-2008

Selección de los indicadores pertinentes. Como se expuso en el apartado 3.6.2, un indicador es pertinente cuando su valor o su evaluación, está en correlación con la evaluación del parámetro de rendimiento a medir.

En la norma se enumeran y definen un total de 71 indicadores: 24 indicadores económicos, 21 técnicos y 26 organizacionales. Estos indicadores serán las variables de salida del sistema que se quiere controlar. Las entradas de control se adecuarán a cada subsistema de control para garantizar conseguir los resultados deseados. Podemos considerar dos tipos elementales de subsistemas como componentes del sistema distribuido eléctrico, sobre los cuales es necesario realizar acciones de control:

- Equipos o máquinas.

- Instalaciones.

A nivel de equipo, máquinas o tipos de máquinas, puede ser deseable un mejor control de:

- la mejora de la disponibilidad;
- la reducción del coste efectivo del mantenimiento;
- la preservación de la salud y de la seguridad, así como la protección del medio ambiente;
- la mejora del coste efectivo de la gestión del valor del inventario de mantenimiento;
- el control de los servicios contratados;
- la fiabilidad;
- los costes;
- la mantenibilidad y soportabilidad del mantenimiento;

En las instalaciones, los indicadores sirven de ayuda en la toma de decisiones relativas a:

- inversiones;
- la duración de utilización;
- la elección de una estrategia, tal como el recurrir a contratistas;

En este trabajo se ha realizado un estudio de campo sectorial para identificar las variables que influyen en los indicadores de rendimiento del mantenimiento.

Metodología del estudio de determinación de variables. Como se ha expuesto en el apartado 3.4.3, el método del caso es el más adecuado para seleccionar las variables que afectan a un sistema como el estudiado. Para discriminar las variables que influyen se optó por un método de investigación empírica que ofreciese resultados a nivel cualitativo. Aplicando como técnicas de recopilación de información las entrevistas semi-estructuradas y grupos focales, ([DBC06] y [TSC07]), se analizaron un total de 48 casos recopilados durante los años 2011 a 2013. En esas fechas, la investigación se orientaba a recopilar las variables, identificar su influencia y generar un modelo que predijese su comportamiento unitario sobre el sistema para tomar la decisión sobre esa predicción. El objetivo se centraba especialmente en recopilar las variables exógenas que condicionan los trabajos de mantenimiento de instalaciones eléctricas. En el análisis agregado de los datos se aplicó un proceso iterativo, muy similar a las fases iniciales utilizadas en la teoría fundamentada (*Grounded Theory*), pues partiendo de un área de estudio, se permite que lo relevante surja [CP08a].

Las fases son:

1. Se generan categorías de información a partir de los datos disponibles.

2. Cada nueva variable se integra dentro de una categoría o se crea otra nueva.
3. Se continúa el proceso hasta que se produce la saturación de cada categoría y no surgen nuevas.

Identificación de variables En cada entrevista y reunión de los grupos focales, el enfoque se dirigía hacia las variables de salida (representadas por los indicadores de mantenimiento), para orientar la búsqueda hacia las causas raíces de las fluctuaciones experimentadas en las salidas (qué variaciones de las variables externas las provocan). La primera y más evidente clasificación de las variables de salida viene expresamente definida en la norma. Los indicadores del rendimiento del mantenimiento pueden ser:

- económicos,
- técnicos,
- organizacionales.

Para el cálculo de los 24 indicadores económicos se utilizan 27 factores que proporcionan información sobre:

- costes,
- tiempo de disponibilidad de las instalaciones,
- materias primas utilizadas,
- cantidad producida en el periodo,
- recursos humanos necesarios,
- valor de los activos,
- valor de producción.

Por otra parte, en el cálculo de los 26 indicadores organizacionales se utilizan 41 factores. Proporcionan información sobre:

- Accidentabilidad.
- Formación.
- Número de órdenes trabajo.
- Recursos humanos.
- Repuestos.
- Tiempo de Trabajo.
- Tiempo de indisponibilidad.

Finalmente, en el cálculo de los 21 indicadores técnicos se utilizan 29 factores. Proporcionan información sobre:

- Accidentabilidad.
- Fallos.
- Número de sistemas.
- Número de trabajos.
- Residuos.
- Tiempo de Trabajo.
- Tiempo de disponibilidad.
- Tiempo de indisponibilidad.

Durante el proceso de análisis, se identificaron 37 factores que no satisfacen los criterios de relevancia ya que no aportan información para la toma de decisiones sobre las acciones que se realizarán en futuros periodos de programación, o bien, los datos requeridos para su cálculo no están disponibles al inicio de cada periodo de programación. En particular se han considerado las siguientes razones:

- El desglose en mantenimiento mecánico, eléctrico y de instrumentación no tiene sentido para las tareas que se realizan. Sustituir un equipo puede ser clasificado dentro de mantenimiento mecánico, eléctrico y de instrumentación, pues puede ser necesario adaptar el alojamiento físico del nuevo equipo o realizar cableados eléctricos. No estarán disponibles por este motivo los factores mostrados en el cuadro 4.1.

Factor	Descripción
Costes totales de contratación del mantenimiento mecánico	Suma de los costes de contratación de las actividades de mantenimiento mecánico.
Costes totales de contratación del mantenimiento eléctrico	Suma de los costes de contratación de las actividades de mantenimiento eléctrico.
Costes totales de contratación del mantenimiento de la instrumentación	Suma de los costes de contratación de las actividades de mantenimiento de la instrumentación.

Cuadro 4.1: Factores de coste no relevantes.

- El mantenimiento basado en la condición, preventivo y sistemático se engloba fácilmente dentro del planificado y programado. El desglose de estos conceptos en niveles inferiores no supone ventajas en instalaciones distribuidas y no resulta sencillo reflejar las diferencias en el instante de planificación, pues, en muchas ocasiones, requiere un análisis posterior. No estarán disponibles por este motivo los factores mostrados en el cuadro 4.2.

Factor	Descripción
Tiempo de mantenimiento sistemático que origina tiempo de indisponibilidad	Intervalo de tiempo durante el cual un bien está en estado de indisponibilidad a causa de mantenimiento sistemático.
Tiempo de indisponibilidad por mantenimiento planificado y programado	El tiempo total de trabajos de mantenimiento planificado y programado que requieren tiempo de indisponibilidad.
Tiempo total de indisponibilidad por mantenimiento	Intervalo de tiempo durante el cual un bien está en estado de indisponibilidad a causa de mantenimiento.

Cuadro 4.2: Factores de tiempos no relevantes.

- El número de empleados dedicados al mantenimiento sólo es función de la extensión de las instalaciones y del tipo de mantenimiento de las mismas. Es constante para el tiempo de programación considerado. No estarán disponibles por este motivo los factores mostrados en el cuadro 4.3.
- El número de horas-hombre dedicadas al mantenimiento es función de la extensión de las instalaciones y del tipo de mantenimiento de las mismas. El reparto dentro de tipos de mantenimiento no estará disponible en los momentos de programación considerados. Por otra parte, suele ser una constante durante el periodo de programación, por lo que no aporta valor tratarlos como variables. No estarán disponibles por este motivo los factores mostrados en el cuadro 4.4.
- En el marco laboral actual, no es posible calcular estos valores. Las horas-hombre de personal interno serán un dato conocido. Sin embargo, de los recursos contratados el único dato disponible será el coste de contratación. No estarán disponibles por este motivo los factores mostrados en el cuadro 4.5.
- En las instalaciones eléctricas, el valor de producción no tiene un significado relevante. Produzcan o no produzcan, los activos de estas instalaciones van a estar sujetos a mantenimiento. No estarán disponibles por este motivo los factores mostrados en 4.6.
- El factor está ligado a la extensión de las instalaciones y por tanto para los periodos de programación considerados es constante. No estarán disponibles por este motivo los factores mostrados en 4.7.
- Los factores dependen del uso, características y extensión de las instalaciones y, por tanto, para los periodos de programación considerados es constante. No estarán disponibles por este motivo los factores mostrados en el cuadro 4.8.
- La cuantificación de la energía utilizada no es una tarea baladí. El esfuerzo de cálculo, al tratarse de múltiples fuentes y formatos, no reporta ventajas apreciables que

Factor	Descripción
Tiempo total de recuperación	Suma de los tiempos de recuperación.
Tiempo de recuperación	Intervalo de tiempo durante el cual un bien está en estado de indisponibilidad debido a un fallo.
Efectivo de personal interno de mantenimiento	Personal interno de mantenimiento (directo e indirecto).
Efectivo total de empleados internos	Efectivo total del personal interno en el activo.
Efectivo de personal indirecto de mantenimiento	Efectivo de personal interno indirecto de mantenimiento.
Efectivo de personal directo de mantenimiento	Efectivo de personal directo de mantenimiento.
Horas-hombre de mantenimiento por operario de producción	Horas-hombre de mantenimiento realizadas por un usuario o un operario.
Horas-hombre de personal interno directo de mantenimiento de instrumentación	Horas-hombre realizadas por personal interno de mantenimiento de instrumentación.
Efectivo de personal interno directo de mantenimiento que usa programas informáticos	Efectivo de personal directo de mantenimiento que utiliza programas informáticos de mantenimiento, durante al menos el 5 % de su tiempo de trabajo, para cualquier actividad de mantenimiento o de gestión de los activos (flujo de órdenes de trabajo, facturas de materiales, planificación, almacén de piezas de repuesto, etc.).
Horas-hombre totales de personal de mantenimiento	Número de horas trabajadas por el personal de mantenimiento.
Efectivo de personal interno directo de mantenimiento	Personal interno directo de mantenimiento.
Horas-hombre totales de los operarios de producción	Horas realizadas por un usuario o un operario de producción, en cualquier otra actividad.

Cuadro 4.3: Factores de efectivos no relevantes.

Factor	Descripción
Horas-hombre totales trabajadas por el personal de mantenimiento	Número de horas-hombre de personal interno de mantenimiento trabajadas realmente.
Tiempo empleado en mantenimiento correctivo de urgencia	Mantenimiento que se realiza sin demora después de detectarse una avería, para evitar consecuencias inaceptables.
Horas-hombre totales de personal interno directo de mantenimiento	Número de horas realizadas por personal interno directo de mantenimiento.
Horas-hombre de personal interno directo de mantenimiento eléctrico	Número de horas realizadas por personal interno directo de mantenimiento eléctrico.
Horas-hombre de personal interno directo de mantenimiento mecánico	Horas-hombre realizadas por personal interno de mantenimiento mecánico.

Cuadro 4.4: Factores de Horas/Hombre no relevantes.

Factor	Descripción
Coste total de personal externo empleado en mantenimiento	Coste del personal externo dedicado a actividades de mantenimiento.
Horas-hombre de mantenimiento correctivo	Horas trabajadas en actividades de mantenimiento correctivo (interno y externo).

Cuadro 4.5: Factores de costes de personal no relevantes.

Factor	Descripción
Valor añadido más los costes externos de mantenimiento	Valor de producción menos el valor de las materias primas, los servicios generales y los servicios adquiridos más los costes externos del mantenimiento.
Cantidad producida	Cantidad obtenida en producción o cantidad de servicio realizado por un activo/bien (toneladas, litros, etc.).
Coste de transformación de la producción	Coste total requerido por un activo o un bien, para transformar un material de entrada en un producto o un servicio, excluyéndose las materias primas y los materiales auxiliares de embalaje.

Cuadro 4.6: Factores de producción no relevantes.

Factor	Descripción
Valor medio de inventario de los artículos de mantenimiento	Valor medio de inventario de los artículos de mantenimiento (piezas de repuesto, consumibles, materiales) en el periodo respectivo.
Coste total de personal interno empleado en mantenimiento	Coste del personal interno empleado en mantenimiento ³ .
Coste por personal indirecto de mantenimiento	Coste total relativo al personal indirecto.
Efectivo del personal de mantenimiento	Efectivo de personal directo más el efectivo de personal indirecto.

Cuadro 4.7: Factores fijos no relevantes.

Factor	Descripción
Número de órdenes de trabajo de mantenimiento	Número de todas las órdenes de trabajo de mantenimiento preventivo y correctivo, así como las órdenes de trabajo para mejoras.
Número de sistemas cubiertos por un análisis de criticidad	Número de sistemas analizados y cubiertos por una metodología, con el fin de evaluar y reducir los riesgos.

Cuadro 4.8: Factores de mantenimiento no relevantes.

aconsejen el uso de este indicador. Por este motivo, no se considera el factor mostrado en el cuadro 4.9.

Factor	Descripción
Energía total utilizada	Energía eléctrica + gas + fuel-oil + cualquier otro tipo de energía.

Cuadro 4.9: Factor de Energía: no relevante.

- La disponibilidad de los empleados dedicados al mantenimiento es función del uso, las características y la extensión de las instalaciones y del tipo de mantenimiento de las mismas. Es constante para el tiempo de programación considerado. Por este motivo, no se considera el factor mostrado en 4.10.

Factor	Descripción
Horas-hombre de mantenimiento por operario de producción	Horas-hombre de mantenimiento realizadas por personas que no pertenecen al departamento de mantenimiento.

Cuadro 4.10: Factor de implicación del personal no relevante.

- La formación del personal de mantenimiento es una obligación empresarial. El coste asociado a la misma es menos relevante que las horas-hombre dedicadas. Por este motivo, no se considera el factor mostrado en 4.11.

Factor	Descripción
Coste de formación del personal de mantenimiento	Coste de formación del personal de mantenimiento directo e indirecto (directo e indirecto).

Cuadro 4.11: Factor de coste de formación no relevante.

- La gestión de los repuestos no puede medirse adecuadamente con un indicador pensado para un sistema concentrado, pues al tratarse de un sistema distribuido podría ser más eficiente disponer de puntos de suministro dispersos y variados para garantizar la disponibilidad cuando sea requerida, sin acumular grandes cantidades en los almacenes. Por este motivo, no se considera el factor mostrado en 4.12.

Factor
Número de piezas de repuesto suministradas por el almacén según peticiones.

Cuadro 4.12: Factor de repuestos no relevante.

Los 59 factores restantes permiten calcular 34 indicadores de rendimiento del mantenimiento:

Los económicos quedan reducidos a los 10 mostrados en el cuadro 4.13.

Indicador	Descripción
E1	<u>Coste total del mantenimiento</u>
E6	<u>Valor de sustitución de los activos</u> <u>Disponibilidad ligada al mantenimiento</u>
E10	<u>Coste total del mantenimiento</u> <u>Coste total de la contratación</u>
E11	<u>Coste total del mantenimiento</u> <u>Coste total de los artículos de mantenimiento</u>
E15	<u>Coste total del mantenimiento</u> <u>Coste del mantenimiento correctivo</u>
E16	<u>Coste total del mantenimiento</u> <u>Coste del mantenimiento preventivo</u>
E17	<u>Coste total del mantenimiento</u> <u>Coste del mantenimiento basado en la condición</u>
E18	<u>Coste total del mantenimiento</u> <u>Coste del mantenimiento sistemático</u>
E19	<u>Coste total del mantenimiento</u> <u>Coste del mantenimiento de mejora</u>
E20	<u>Coste total del mantenimiento</u> <u>Coste de paradas programadas para mantenimiento</u> <u>Coste total del mantenimiento</u>

Cuadro 4.13: Indicadores económicos relevantes.

La información agregada que proporcionan permite la medición de las variables agregadas sobre:

- costes,
- tiempo de disponibilidad de las instalaciones,
- valor de los activos.

Los organizacionales identificados como relevantes son los 7 indicados en la tabla 4.14.

Indicador	Descripción
O5	$\frac{\text{Horas-hombre de mantenimiento planificado y programado}}{\text{Horas-hombre totales de mantenimiento disponibles}}$
O7	$\frac{\text{Horas-hombre perdidas por lesiones del personal de mantenimiento}}{\text{Horas-hombre totales trabajadas por el personal de mantenimiento}}$
O11	$\frac{\text{Tiempo empleado en mantenimiento correctivo de urgencia}}{\text{Tiempo total de indisponibilidad ligado a mantenimiento}}$
O21	$\frac{\text{Horas-hombre suplementarias de mantenimiento interno}}{\text{Horas-hombre totales de personal interno de mantenimiento}}$
O22	$\frac{\text{Número total de órdenes de trabajo programadas}}{\text{Número de órdenes de trabajo realizadas según programación}}$
O23	$\frac{\text{Nº de HH para formación del personal interno de mantenimiento}}{\text{Horas/hombre totales de mantenimiento interno}}$
O25	$\frac{\text{HH totales de personal directo en Planificado y Programado}}{\text{HH totales planificadas y programadas para personal directo}}$

Cuadro 4.14: Indicadores organizacionales relevantes.

La información agregada que proporcionan permite la medición de las variables agregadas sobre:

- Accidentabilidad.
- Formación.
- Número de órdenes trabajo.
- Recursos humanos.
- Tiempo de Trabajo.

Y, finalmente, los técnicos quedan reducidos a los 17 reflejados en el cuadro 4.15 La información agregada que proporcionan permite la medición indirecta de las variables sobre:

- Accidentabilidad.
- Fallos.
- Número de sistemas.
- Número de trabajos.
- Residuos.
- Tiempo de Trabajo.
- Tiempo de disponibilidad.
- Tiempo de indisponibilidad.

Tomando como punto de partida estos agrupadores, y con la metodología explicada en el apartado anterior, se identifican las variables que las condicionan. Los grupos de variables de entrada son:

- Asociadas al tipo de fallo:

Indicador	Descripción
T1	$\frac{\text{Tiempo total de funcionamiento}}{\text{Tiempo de indisponibilidad por mantenimiento}}$
T2	$\frac{\text{Tiempo de disponibilidad conseguido durante el tiempo requerido}}{\text{Tiempo requerido}}$
T3	$\frac{\text{Nº de fallos debidos a mantenimiento que crean daño medioambiental}}{\text{Tiempo de calendario}}$
T4	$\frac{\text{Volumen anual de residuos o efectos nocivos por el mantenimiento}}{\text{Tiempo de calendario}}$
T5	$\frac{\text{Número de lesiones del personal debidas al mantenimiento}}{\text{Tiempo de trabajo}}$
T6	$\frac{\text{Tiempo total de funcionamiento}}{\text{Tiempo de indisponibilidad por fallos}}$
T7	$\frac{\text{Tiempo indisponibilidad por mantenimiento planificado y programado}}{\text{Tiempo total de funcionamiento}}$
T11	$\frac{\text{Número de fallos que causan lesiones al personal}}{\text{Número total de fallos}}$
T12	$\frac{\text{Número de fallos que pueden causar lesiones al personal}}{\text{Número total de fallos}}$
T13	$\frac{\text{Número de fallos que causan daño al medio ambiente}}{\text{Número total de fallos}}$
T14	$\frac{\text{Número de fallos que pueden causar dano al medio ambiente}}{\text{Número total de fallos}}$
T15	$\frac{\text{Nº de órdenes de mantenimiento que causan indisponibilidad}}{\text{Tiempo total de funcionamiento}}$
T16	$\frac{\text{Número de órdenes de trabajo de mantenimiento}}{\text{Tiempo total de funcionamiento}}$
T17	$\frac{\text{Número total de fallos}}{\text{HH utilizadas para planificar el mantenimiento sistemático}}$
T19	$\frac{\text{HH totales de personal interno de mantenimiento}}{\text{Tiempo Planificado y Programado -¿Indisponibilidad en producción}}$
T20	$\frac{\text{Tiempo total Planificado y Programado que requiere de indisponibilidad}}{\text{Tiempo total de recuperación}}$
T21	$\frac{\text{Número total de fallos}}{\text{Número total de fallos}}$

Cuadro 4.15: Indicadores técnicos relevantes.

1. Disruptivo
2. Evolutivo
 - a) Desajustes
 - b) Fatiga
 - c) Envejecimiento
- Asociadas al alcance del fallo
 1. Daños en un equipo
 2. Daños en una familia de equipos
 3. Daños en una instalación
 4. Daños en múltiples instalaciones
- Asociadas a los efectos del fallo
 1. Cumplimiento de la reglamentación
 2. Seguridad
 - a) Personas
 - 1) Terceros ajenos a las instalaciones
 - 2) Trabajadores
 - b) Equipos o instalaciones
 - 1) Daños instalación del equipo
 - 2) Daños en otras instalaciones
 - c) Medioambiente
 3. Calidad
 - a) Continuidad del suministro
 - b) Calidad del producto
- Asociadas a la instalación
 1. Diseño
 - a) Instalación principal
 - b) Instalación auxiliar
 2. Entorno Físico
 - a) Orografía

- b) Clima 1) Temperatura 2) Lluvia 3) Viento 4) Humedad
- c) Territorio
- d) Vías de comunicación
- e) Iluminación
- f) Ruido
- g) Espacio de trabajo

3. Entorno Social

- a) Opinión pública
- b) Medios de Comunicación
- c) Política

■ Asociadas a los Recursos

1. Humanos

- a) Formados
- b) Disponibles

2. Materiales

- a) Adecuados
- b) Disponibles

3. Económicos

- a) Limitados a la reparación
- b) Afectan a otras instalaciones
- c) Afectan a otros recursos

Analizando los grupos de entradas a partir de los agrupadores de variables de salida e identificando sus interrelaciones obtenemos las variables que afectan a los trabajos y que, a continuación, desglosamos.

■ Costes

- Diseño de la instalación.
 - Tecnología de los equipos.
 - Modelo constructivo de las instalaciones.
 - Implementación física de las instalaciones.

- Posibilidad de redundancia de equipos que facilitan las tareas de mantenimiento.
- Disposición de equipos para simplificar los trabajos.
- Costes de transporte
 - Precio del combustible.
 - Infraestructuras de comunicación.
 - Distancia hasta la instalación.
 - Ubicación de la instalación. Condiciona el coste al influir sobre la velocidad de desplazamiento, los posibles atascos, etc.
 - Estacionalidad. Puede condicionar en dos vertientes:
 - ◇ Por el estado de las carreteras, más rápidas y seguras normalmente en verano que en invierno.
 - ◇ Por los atascos que se pueden producir en determinadas zonas en distintas épocas del año.
- Coste de los repuestos. Si bien, el precio del repuesto de un determinado equipo, puede ser determinado con precisión en un determinado momento, puesto que las instalaciones eléctricas tienen larga vida, es posible que cuando se requiera un determinado equipo, al coste fijo haya que sumarle variables: servicios de transporte desde otras ciudades, nocturnidad, etc.
- Efectivos : Número de trabajadores.
- Número de instalaciones.
- Tiempo de indisponibilidad: Un incremento del tiempo de indisponibilidad da pie a reducciones de costes, ajustando la ventana de reparación a la que permita mejores ahorros.
- Valor de inversión.
 - Diseño de las instalaciones.
 - Normalizado. Permiten fijar familias de equipos. Para cada familia se identifica la tasa de fallo. Los repuestos se determinan con esa tasa y esto permite una reducción del inmovilizado ajustándolo a un volumen crítico que permita atender al máximo volumen de averías simultáneas esperadas.
 - Particularizado. Exigen una mayor variedad y cantidad de repuestos para atender las averías.
 - Tecnología

- Modular: La tecnología modular permite disponer de elementos que se pueden utilizar en múltiples ubicaciones.
- Compacta: Los equipos compactos no disponen de elementos intercambiables. Cuando se estropea un componente es necesario sustituir todo el equipo antes de poder ser reparado en la fábrica o el taller especializado.
- Tiempo de indisponibilidad: Si la instalación puede estar fuera de servicio hasta que lleguen los repuestos se puede reducir el volumen de inmovilizado necesario para atender los fallos.
- Ubicación de las instalaciones: A mayor distancia entre las instalaciones y las bases de trabajo, mayores son las obligaciones para disponer de un volumen de repuestos en las cercanías de las instalaciones, pudiendo llegar a ser necesario disponer de almacenes secundarios.
- Tiempo de disponibilidad.
 - Diseño: Los sistemas redundados aumentan la disponibilidad del sistema.
 - Tecnología: Las tecnologías más fiables permiten aumentar el tiempo de disponibilidad al sufrir menos fallos y requerir menos intervenciones de mantenimiento.
 - Recursos humanos: Cuanto mayor se precise que sea el tiempo de disponibilidad, más personal capacitado y bien ubicado hará falta. Esto tiene especial importancia cuando se detecta un fallo, pues el tiempo de desplazamiento influye. Si la base de trabajo está alejada de las instalaciones, se necesitará un mayor tiempo de desplazamiento.
 - Repuestos: Ocurre lo mismo que con las bases de trabajo. Los almacenes deberán estar a una distancia tal que permita ajustar el tiempo de desplazamiento para mantener el tiempo de disponibilidad dentro de los parámetros fijados.
 - Trabajos de mantenimiento: El número de trabajos de mantenimiento: paradas, revisiones, reajustes, . . . tendrá que adaptarse a las necesidades de cada equipo para asegurar que están disponibles todo el tiempo requerido.
 - Estacionalidad: Factores como la época del año (verano, invierno, . . .) afectan a las exigencias de servicio de las instalaciones. En zonas vacacionales es importante asegurar la disponibilidad de las instalaciones en verano, pero es irrelevante que estén disponibles en invierno.
 - Climatología: El clima: temperatura, viento, humedad, precipitaciones, . . . influyen sobre los equipos afectando su nivel de funcionamiento y, por tanto, condicionando sus capacidades para dar servicio. Épocas o zonas con climas benignos proporcionan mejores tiempos de disponibilidad que otras con temporales o condiciones permanentemente adversas.

- Tiempo de indisponibilidad. Está afectado por los mismos factores que el tiempo de disponibilidad, pero obviamente, en sentido opuesto.
- Tiempo de Trabajo
 - Efectivo de personal. Número de personas que pueden realizar los trabajos en un periodo de programación.
 - Estacionalidad. Durante los periodos vacacionales, el número de trabajadores disponibles siempre será más limitado que en otras épocas del año. Por contra, en otras épocas también habrá causas de absentismo ligadas a la época, como, por citar solo una muestra, las enfermedades propias del invierno.
 - Día de la semana: Los periodos de trabajo que incluyan fines de semana tendrán, normalmente, menos personal asignado que los realizados durante la semana laboral.
 - Tipo de tarea. La tecnología de las instalaciones marca diferencias sobre la formación del personal que puede acometer trabajos sobre ellas. Esto hace que el tiempo de trabajo efectivo durante un periodo de programación pueda ser diferente en función del tipo de tarea que sea necesario realizar.
 - Tiempo efectivo de trabajo. El tiempo de trabajo total durante un periodo de programación está limitado por las condiciones legales y las relaciones contractuales de los trabajadores. Nunca se podrá dedicar todo ese tiempo a los trabajos sobre equipos o instalaciones, debido fundamentalmente a los desplazamientos y otras tareas auxiliares necesarias para preparar los trabajos.
- Accidentabilidad
 - El tema de la accidentabilidad está ampliamente estudiado por instituciones como el Instituto nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo [Fra11].
 - En este trabajo nos limitamos a enumerar las variables que influyen sobre otras y afectan a la realización final de los trabajos.
 - Estacionalidad.
 - Día de la semana.
 - Hora de la jornada
 - Tipo de tarea o actividad.
 - Factor humano: distracciones, incumplimientos de las normas, prisas, estado físico-psíquico de los trabajadores, etc.
 - Herramientas inadecuadas.
 - Instalaciones en mal estado.

- Entorno físico de las instalaciones. El tipo de entorno donde se ubican las instalaciones (residencial urbano, industrial, rural, montaña o alta montaña, . . .) incrementa o reduce los tiempos de desplazamiento, tipo de riesgos exógenos presentes, etc. Por otro lado, influye sobre las distancias que hay que recorrer.
- Recursos humanos
 - Durante cada periodo de programación, el personal disponible para realizar las tareas tendrá diferentes:
 - Perfiles personales.
 - Formación y capacitación para realizar cada tarea.
 - El tipo de jornada también podría ser diferente o no, pero en todo caso condiciona el tiempo de trabajo total.
 - El número de personas disponibles variará de acuerdo a la carga de trabajo.
 - Cuando hablamos de un sistema distribuido por amplias zonas geográficas se convierten en variables factores normalmente constantes, que afectan a unos trabajos y no a otros.
 - Marco legal.
 - Entorno geográfico.
 - Entorno social.
 - Todos ellos pueden variar de instalación a instalación en función de la población, municipio, provincia y Comunidad Autónoma.
- Número de Fallos.
 - Está determinado por el número de componentes de cada subsistema que conforma el sistema principal.
 - Cada componente tendrá una tasa de fallo estadística. Este parámetro no fija ningún valor para un periodo corto de tiempo, motivo por el que durante un periodo de programación esta variable será completamente aleatoria.
- Número de órdenes de trabajo.
 - Influenciado por el número de fallos sobre componentes e instalaciones.
- Residuos.
 - Los residuos consumen un tiempo de eliminación que afecta a los tiempos de trabajos efectivos, de disponibilidad e indisponibilidad.

- También afecta a la formación y especialización de recursos humanos y materiales para su tratamiento y eliminación.

En este análisis no se reflejan de manera pormenorizada los costes del mantenimiento. Simplemente se han identificado los elementos variables de dichos costes que afectan a la realización de trabajos durante un periodo de programación⁴. El mismo razonamiento se ha utilizado para los demás factores: tiempos de disponibilidad e indisponibilidad, personal efectivo, número de trabajos que se pueden realizar, etc

Necesidad de simplificación. El exhaustivo trabajo de campo realizado durante los años indicados en los apartados anteriores, puso de manifiesto las enormes dificultades de identificar fielmente las variables que influyen sobre los trabajos de mantenimiento. Un problema adicional es la falta de valores medibles, incluso a nivel cualitativo, en un determinado instante de programación.

La cantidad de variables aleatorias que aparecen cuando un sistema físico interactúa con un entorno ambiental no controlado (ni controlable), provocarían el fracaso práctico de cualquier modelo matemático que pretendiese abordar este problema. La demostración teórica de la bondad del modelo quedaría expuesta a ser refutada al aplicarlo a cualquier caso general.

Por este motivo, esta investigación se orientó hacia la consecución de un modelo matemático que pudiese aportar valor incluso con estos grados de incertidumbre y que fuese independiente del número de variables.

El modelo adaptativo propuesto cumple con estos requisitos y se puede implementar de forma genérica permitiendo su utilización en cualquier campo de decisión.

Cláusulas disyuntivas aplicables.

Las cláusulas son combinaciones disyuntivas de variables. Se analizan en este apartado aquellas cláusulas que es necesario tener en cuenta cuando se plantea la disyuntiva de aceptar o no un proyecto, en forma de trabajos que es necesario realizar sobre una instalación. El trabajo de mantenimiento estará originado por causas asociadas a un fallo que influirá sobre las instalaciones y su entorno y cuya repercusión será necesario identificar para la aceptación de los trabajos asociados. Cuando no se cumplan estos condicionantes, el trabajo no será considerado aceptable y se suspenderán las acciones sobre los elementos asociados al mismo hasta que nuevos elementos de decisión se incorporen.

⁴A pesar de que la distancia entre cada instalación y el almacén de repuestos es una constante para cada instalación, para la gestión de los trabajos es una variable que influye a la hora de fijar las rutas por costes de desplazamientos.

Elementos que influyen en la Seguridad. Las variables que determinan la seguridad de trabajadores, instalaciones y terceros cuando se produce un fallo en una instalación se reflejan en la tabla 4.16. La cláusula vendrá dada por la ecuación:

$$\bigvee_{i=1}^{k=6} CS_{is} = CS_1 \vee CS_2 \vee CS_3 \vee CS_4 \vee CS_5 \vee CS_6 \quad (4.4)$$

Descripción de la variable	Codificación
El fallo es disruptivo	CS_1
El fallo causa daños en las instalaciones	CS_2
El equipo está situado en un entorno no controlado	CS_3
El fallo provoca vertidos al medio ambiente	CS_4
El fallo provoca pérdidas de servicios críticos	CS_5
El fallo se produce en condiciones climatológicas adversas	CS_6

Cuadro 4.16: Variables que afectan a la seguridad.

Elementos que influyen en la reglamentación de las instalaciones. Que una instalación esté acorde a la reglamentación influye considerablemente en la seguridad. Sin embargo, en el contexto de programación de trabajos las variables que inciden sobre el estado, reglamentario o no, de una instalación sobre la que se requieren actuaciones se reflejan en la tabla 4.17. La cláusula vendrá dada por la ecuación:

$$\bigvee_{i=1}^{k=4} CR_{ir} = CR_1 \vee CR_2 \vee CR_3 \vee CR_4 \quad (4.5)$$

Descripción de la variable	Codificación
El fallo modifica la disposición física dentro de las instalaciones.	CR_1
El fallo cambia la interacción de las instalaciones con el entorno.	CR_2
El fallo afecta a las condiciones de seguridad de los trabajos en las instalaciones	CR_3
El fallo afecta a infraestructuras de comunicación.	CR_4

Cuadro 4.17: Variables que afectan al estado reglamentario de las instalaciones.

Elementos que influyen sobre la sociedad. Los trabajos en las instalaciones causan interacción con el entorno social donde se ubican. Son de especial relevancia las interacciones ocasionadas por fallos de los tipos reflejados en la tabla 4.18. La cláusula vendrá dada por la ecuación:

$$\bigvee_{i=1}^{k=5} CE_{ie} = CE_1 \vee CE_2 \vee CE_3 \vee CE_4 \vee CE_5 \quad (4.6)$$

Descripción de la variable	Codificación
El fallo provoca pérdida de servicios esenciales.	CE_1
El fallo provoca incendios.	CE_2
El fallo provoca explosiones	CE_3
El fallo provoca fugas de gases	CE_4
El fallo provoca cortes de infraestructuras	CE_5

Cuadro 4.18: Variables que afectan a la percepción social de los fallos y trabajos.

Elementos que influyen sobre la calidad de servicio. La calidad de servicio podría estar incluida dentro de la reglamentación y las interacciones sociales. Sin embargo, tiene una componente fuertemente técnica que exige un análisis independientemente, puesto que existen situaciones donde por esos criterios quedarían excluidas ciertas intervenciones que deben ser acometidas sin dilación. Estos factores serán los indicados en la tabla 4.19. La cláusula vendrá dada por la ecuación:

$$\bigvee_{i=1}^{k=4} CQ_{iq} = CQ_1 \vee CQ_2 \vee CQ_3 \vee CQ_4 \quad (4.7)$$

Descripción de la variable	Codificación
El fallo provoca múltiples cortes de poca duración.	CQ_1
El fallo afecta a muchos clientes (en una zona o en varias)	CQ_2
El fallo provoca alteraciones del servicio: microcortes, flicker, etc.	CQ_3
El fallo provoca corte de servicio por un largo periodo de tiempo	CQ_4

Cuadro 4.19: Variables que afectan a la calidad del servicio.

Elementos que influyen sobre la economía o los costes. Cuando se detecta un fallo, sus consecuencias económicas pueden ser inmediatas o pueden llegar a prolongarse en el tiempo. Los factores económicos que influyen sobre la aceptación de los trabajos una vez identificado un problema serán los indicados en la tabla 4.20. La cláusula vendrá dada por la ecuación:

$$\bigvee_{i=1}^{k=3} CD_{id} = CD_1 \vee CD_2 \vee CD_3 \quad (4.8)$$

Descripción de la variable	Codificación
El fallo afecta a una familia de equipos que es necesario sustituir	CD_1
El fallo afecta a equipos críticos para el servicio. Si fallan se producirán pérdidas económicas por paradas o trabajos adicionales.	CD_2
El fallo provoca daños a terceros.	CD_3

Cuadro 4.20: Variables que afectan a los costes económicos de los fallos y trabajos asociados.

Elementos que influyen sobre los recursos. Determinados fallos tendrán exigencias específicas de formación y equipamiento antes de poder acometer su reparación. Esta cláusula por sí sola generará la necesidad de acometer la formación necesaria del personal, la compra del equipamiento o la contratación del servicio. Si esta cláusula resulta ser verdadera, el fallo y la solución que se le dará constituyen un problema de decisión independiente. Las variables serán las indicadas en la tabla 4.21. La cláusula vendrá dada por la ecuación:

$$\bigvee_{i=1}^{k=3} CF_{if} = CF_1 \vee CF_2 \vee CF_3 \quad (4.9)$$

Descripción de la variable	Codificación
El fallo requiere personal con formación especializada.	CF_1
La reparación requiere equipos y herramientas específicos.	CF_2
La reparación es económicamente inviable.	CF_3

Cuadro 4.21: Variables que afectan a la capacidad de los recursos para atender un fallo o trabajo de reparación.

Fórmula normal conjuntiva

El problema se puede resolver si existe una combinación de valores de las variables que convierta en verdadera (sea satisfacible) la fórmula, denominada Fórmula Normal Conjuntiva que se obtiene a partir de las seis cláusulas anteriores resumidas en la tabla 4.22. La ecuación de la fórmula normal conjuntiva tendrá entonces la siguiente expresión:

Cláusula	Disyunción	Codificación
Seguridad	$\bigvee_{i=1}^{k=7} CS_{is}$	CS
Reglamentación	$\bigvee_{i=1}^{k=4} CR_{ir}$	CR
Entorno social	$\bigvee_{i=1}^{k=5} CE_{ie}$	CE
Calidad de servicio	$\bigvee_{i=1}^{k=4} CQ_{iq}$	CQ
Factores económicos	$\bigvee_{i=1}^{k=3} CD_{id}$	CD
Recursos disponibles	$\bigvee_{i=1}^{k=3} CF_{if}$	CF

Cuadro 4.22: Cláusulas disyuntivas que influyen en la aceptación de trabajos.

$$CNF = \bigwedge_{i=1}^{k=7} clausula_i = CS \wedge CR \wedge CE \wedge CQ \wedge CD \wedge \neg CF \quad (4.10)$$

Cuando $CNF = Verdadero$ el trabajo pasará a la lista de trabajos aceptados y se asignará a todas las instalaciones que estén afectadas por el fallo. En las siguientes etapas se decidirán el periodo de programación y los recursos necesarios para realizar el trabajo. Cuando se han satisfecho todas las cláusulas, el proyecto se acepta. A continuación va a ser necesario acometer las tareas precisas para realizarlo. Se resolverán las siguientes fases

del problema: identificar cuándo y con qué medios se realizarán las tareas de una manera eficiente.

4.4.2. Selección de un subconjunto de alternativas dentro de un conjunto de proyectos aceptables.

Determinación de la variable de control.

Las tareas (proyectos) que han sido aceptadas en la etapa anterior van a ser consideradas las entradas de un sistema, como el ilustrado en 4.11, cuya salida queremos controlar. Sobre este modelo se aplicarán los conceptos de adaptación expuestos con anterioridad.

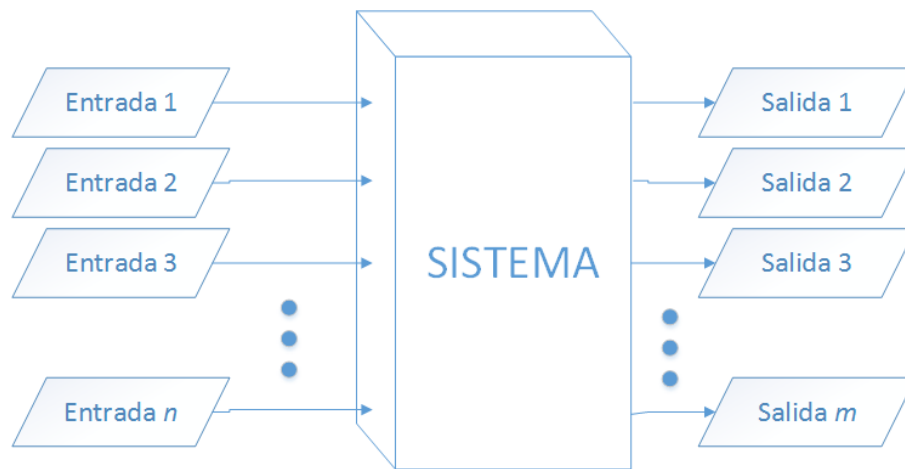


Figura 4.11: Modelo de caja negra para un sistema de múltiples entradas y salidas

Las salidas del sistema serán los índices de calidad. Los valores de estos índices se fijarán para conseguir los objetivos marcados por el plan estratégico de la empresa. Respecto a los índices propuestos en la norma UNE15341, se han seleccionado aquellos que son representativos y que pueden ser calculados con facilidad en cada periodo de planificación.

Como se comentó en el apartado 3.6.2, los índices representan las salidas del sistema a controlar. En el caso de estudio, se han seleccionado los reflejados en la tabla 4.23.

Indicador
$E1 = \frac{\text{Coste total del mantenimiento}}{\text{Valor de sustitución de los activos (Valor de sustitución de la instalación)}}$
$E6 = \frac{\text{Disponibilidad ligada al mantenimiento}}{\text{Coste total del mantenimiento}}$
$E7 = \frac{\text{Valor medio de inventario de los artículos de mantenimiento}}{\text{Valor de sustitución de los activos respectivos}}$
$E8 = \frac{\text{Coste total de personal interno empleado en mantenimiento}}{\text{Coste total del mantenimiento}}$
$E9 = \frac{\text{Coste total de personal externo empleado en mantenimiento}}{\text{Coste total del mantenimiento}}$
$E10 = \frac{\text{Coste total de la contratación}}{\text{Coste total del mantenimiento}}$
$E11 = \frac{\text{Coste total de los artículos de mantenimiento}}{\text{Coste total del mantenimiento}}$
Sigue en la página siguiente.

Indicador
$E12 = \frac{\text{Coste total de los artículos de mantenimiento}}{\text{Valor medio de inventario de los artículos de mantenimiento}}$
$E13 = \frac{\text{Coste por personal indirecto de mantenimiento}}{\text{Coste total del mantenimiento}}$
$E15 = \frac{\text{Coste del mantenimiento correctivo}}{\text{Coste total del mantenimiento}}$
$E16 = \frac{\text{Coste del mantenimiento preventivo}}{\text{Coste total del mantenimiento}}$
$E17 = \frac{\text{Coste del mantenimiento basado en la condición}}{\text{Coste total del mantenimiento}}$
$E18 = \frac{\text{Coste del mantenimiento sistemático}}{\text{Coste total del mantenimiento}}$
$E19 = \frac{\text{Coste del mantenimiento de mejora}}{\text{Coste total del mantenimiento}}$
$E20 = \frac{\text{Coste de paradas programadas para mantenimiento}}{\text{Coste total del mantenimiento}}$
$E21 = \frac{\text{Coste de formación del personal de mantenimiento}}{\text{Efectivo del personal de mantenimiento}}$
$T1 = \frac{\text{Tiempo total de funcionamiento}}{\text{Tiempo de indisponibilidad por mantenimiento}}$
$T2 = \frac{\text{Tiempo de disponibilidad conseguido durante el tiempo requerido}}{\text{Tiempo requerido}}$
$T3 = \frac{\text{Número de fallos debidos a mantenimiento que crean daño medioambiental}}{\text{Tiempo de calendario}}$
$T4 = \frac{\text{Volumen anual de residuos o de efectos nocivos relacionados con el mantenimiento}}{\text{Tiempo de calendario}}$
$T5 = \frac{\text{Número de lesiones del personal debidas al mantenimiento}}{\text{Tiempo de trabajo}}$
$T6 = \frac{\text{Tiempo total de funcionamiento}}{\text{Tiempo de indisponibilidad por fallos}}$
$T7 = \frac{\text{Tiempo total de funcionamiento}}{\text{Tiempo de indisponibilidad por mantenimiento planificado y programado}}$
$T8 = \frac{\text{Tiempo de mantenimiento preventivo que origina tiempo de indisponibilidad}}{\text{Tiempo total de indisponibilidad por mantenimiento}}$
$T10 = \frac{\text{Tiempo de mantenimiento basado en la condición que origina tiempo de indisponibilidad}}{\text{Tiempo total de indisponibilidad por mantenimiento}}$
$T11 = \frac{\text{Número de fallos que causan lesiones al personal}}{\text{Número total de fallos}}$
$T12 = \frac{\text{Número de fallos que pueden causar lesiones al personal}}{\text{Número total de fallos}}$
$T13 = \frac{\text{Número de fallos que causan daño al medio ambiente}}{\text{Número total de fallos}}$
$T14 = \frac{\text{Número de fallos que pueden causar daño al medio ambiente}}{\text{Número total de fallos}}$
$T15 = \frac{\text{Número de órdenes de trabajo de mantenimiento que causan tiempo de indisponibilidad}}{\text{Tiempo total de funcionamiento}}$
$T16 = \frac{\text{Número de órdenes de trabajo de mantenimiento}}{\text{Tiempo total de funcionamiento}}$
$T17 = \frac{\text{Número de sistemas cubiertos por un análisis de criticidad}}{\text{Número total de fallos}}$
$T18 = \frac{\text{Número de sistemas cubiertos por un análisis de criticidad}}{\text{Número total de sistemas}}$
$T20 = \frac{\text{Tiempo Planificado y Programado que causa indisponibilidad de producción}}{\text{Tiempo total de Planificado y Programado que requiere tiempo de indisponibilidad}}$
$T21 = \frac{\text{Tiempo total de recuperación}}{\text{Número total de fallos}}$
$O5 = \frac{\text{Horas-hombre de mantenimiento planificado y programado}}{\text{Horas-hombre totales de mantenimiento disponibles}}$
$O6 = \frac{\text{Número de lesiones del personal de mantenimiento}}{\text{Efectivo de personal interno de mantenimiento}}$
$O7 = \frac{\text{Horas-hombre perdidas por lesiones del personal de mantenimiento}}{\text{Horas-hombre totales trabajadas por el personal de mantenimiento}}$
$O11 = \frac{\text{Tiempo empleado en mantenimiento correctivo de urgencia}}{\text{Tiempo total de indisponibilidad ligado a mantenimiento}}$
$O16 = \frac{\text{Horas-hombre de mantenimiento correctivo}}{\text{Horas-hombre totales de mantenimiento}}$
$O17 = \frac{\text{Horas-hombre de mantenimiento correctivo de urgencia}}{\text{Horas-hombre totales de mantenimiento}}$
$O18 = \frac{\text{Horas-hombre de mantenimiento preventivo}}{\text{Horas-hombre totales de mantenimiento}}$
$O19 = \frac{\text{Horas-hombre de mantenimiento basado en la condición}}{\text{Horas-hombre totales de mantenimiento}}$

Sigue en la página siguiente.

Indicador
$O20 = \frac{\text{Horas-hombre de mantenimiento sistemático}}{\text{Horas-hombre totales de mantenimiento}}$
$O21 = \frac{\text{Horas-hombre suplementarias de mantenimiento intemo}}{\text{Horas-hombre totales de personal intemo de mantenimiento}}$
$O22 = \frac{\text{Número de órdenes de trabajo realizadas según programación}}{\text{Número total de órdenes de trabajo programadas}}$
$O23 = \frac{\text{Número de horas- hombre para formación del personal intemo de mantenimiento}}{\text{Horas-hombre totales de mantenimiento intemo}}$
$O25 = \frac{\text{HH totales trabajadas por personal directo en actividades planificadas y programadas}}{\text{Horas-hombre totales planificadas y programadas para personal directo}}$

Cuadro 4.23: Selección de indicadores de mantenimiento que representan las salidas del sistema en estudio.

Las perturbaciones que afectan al sistema debidas a las variables de entorno no controladas van a estar implícitas en los estados anteriores. Podremos entonces, aplicar el modelo simplificado de control adaptativo para llevar las variables de salida hasta la consigna deseada. Una trayectoria natural de evolución para una variable física se muestra en la figura 4.12.

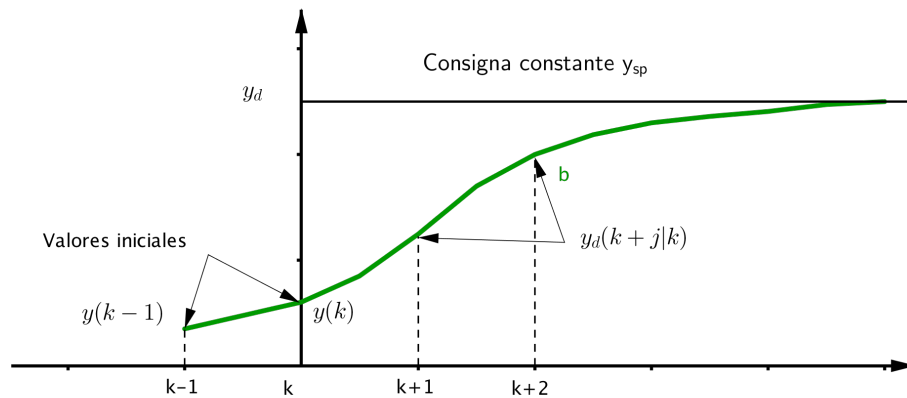


Figura 4.12: Trayectoria deseada proyectada TDP_k .

El modelo matemático aplicable para el caso multivariable será:

$$U(k) = \hat{U}(k|k) = \frac{Y_r(k + \lambda|k) - \sum_{i=1}^{\hat{n}} \hat{E}_i^{(\lambda)} Y(k + 1 - i) - \sum_{i=2}^{\hat{m}} \hat{G}_i^{(\lambda)} U(k + 1 - i)}{\hat{H}^{(\lambda)}} \quad (4.11)$$

con

$$\hat{E}_i^{(\lambda)} = \hat{E}_1^{(\lambda-1)} \hat{A}_i + \hat{E}_{i+1}^{(\lambda-1)}; \quad i = 1, \dots, \hat{n}; \quad j = 2, \dots, \lambda \quad (4.12)$$

$$\hat{G}_i^{(\lambda)} = \hat{E}_1^{(\lambda-1)} \hat{B}_i + \hat{G}_{i+1}^{(\lambda-1)}; \quad i = 1, \dots, \hat{m}; \quad j = 2, \dots, \lambda \quad (4.13)$$

$$\hat{H}^{(\lambda)} = \hat{G}_1^{(\lambda)} + \hat{G}_1^{(\lambda-1)} + \dots + \hat{G}_1^{(1)} \quad (4.14)$$

siendo

$$\begin{aligned} \hat{E}_i^{(1)} &= \hat{A}_i; & i &= 1, \dots, \hat{n}; \\ \hat{E}_{\hat{n}+1}^{(\lambda-1)} &= \vec{0}; & j &= 1, \dots, \lambda; \end{aligned}$$

con

$$\begin{aligned} \hat{G}_i^{(1)} &= \hat{B}_i; & i &= 1, \dots, \hat{m}; \\ \hat{G}_{\hat{m}+1}^{(\lambda-1)} &= \vec{0}; & j &= 2, \dots, \lambda; \end{aligned}$$

Para poder introducir las tareas dentro del modelo, es necesario expresarlas de manera adecuada en términos matemáticos para su tratamiento.

Resolviendo los parámetros del modelo para cada instante de programación, es posible calcular el valor de acción que es necesario aplicar sobre cada una de las variables de entrada para conseguir los valores de salida deseados.

Asignación secuencial de proyectos.

Una vez que se ha obtenido en el paso anterior el valor de la acción de control sobre cada variable, se procede a seleccionar el conjunto de proyectos que permiten alcanzar ese valor. Este proceso se repetirá en cada instante de control, definiendo una representación en tiempo discreto del sistema. Esta selección saldrá de la solución del problema de asignación secuencial (*Secretary Problem*). El responsable tiene que seleccionar las "mejores" tareas de entre el catálogo disponible. En la práctica no se trata de conseguir un óptimo de planificación. El tiempo de cómputo podría ser excesivo y la solución óptima podría llegar a no ser aplicable por motivos ajenos a la propia planificación. El problema de asignación secuencial trata de resolver precisamente esta situación: en la selección de candidatos para ocupar un puesto de empleo todos los candidatos tienen los requisitos para ser entrevistados y queda en manos del entrevistador la elección del mejor candidato. Con los proyectos ocurre algo muy similar. Las tareas se presentan al responsable de forma secuencial. Normalmente tendrá más tareas que recursos. Los recursos muy a menudo hacen referencia al personal que se encarga de ejecutar las tareas. Los conocimientos y capacidades de cada persona son diferentes, por lo que encontrar las tareas más apropiadas para cada persona es una prioridad.

El problema se formula de la siguiente manera [BHZ13]: Sea un conjunto de elementos de entrada a_1, a_2, \dots, a_n entre los cuales hay que seleccionar los que mejor cumplen los requisitos fijados por la función $f : 2^S \mapsto \mathbb{R}$.

Si B es un subconjunto de $A \subseteq S$, tenemos que $f(B \cup A) = f(A)$

Cada elemento se evalúa de manera secuencial en el orden a_1, a_2, \dots, a_n .

Se divide el conjunto de entrada en k subconjuntos de l elementos, siendo $l = \frac{n}{k}$.

Los elementos del subconjunto j serán:

$$S_j = \{a_{(j-1)l+1}, a_{(j-1)l+2}, \dots, a_{jl}\} \quad \text{con } 1 \leq j < k$$

, y los elementos del subconjunto S_k :

$S_k = \{a_{(k-1)l+1}, a_{(k-1)l+2}, \dots, a_n\}$ En cada subconjunto se selecciona un elemento. En el instante i -ésimo tendremos seleccionados un conjunto T_i de elementos correspondientes a los subconjuntos ya revisados, partiendo de $T_0 = 0$:

$$\bigcup_{j=1}^i S_j$$

Se intenta seleccionar el elemento e de los que conforman el subconjunto S_j que maximice la función:

$$g_i(e) = f(T_{i-1} \cup \{e\}) - f(T_{i-1}) \quad (4.15)$$

O dicho de otra manera:

$$\text{Se selecciona el elemento: } x \in S_i \quad / \quad \max(g_i(x)) \quad (4.16)$$

Este algoritmo se aplica de manera iterativa sobre el conjunto de todas las tareas que han sido aceptadas y que no han sido realizadas todavía, hasta seleccionar tantas tareas como sean necesarias para completar el valor de entrada requerido para la acción de control $u_i(k)$.

Con este planteamiento se consigue seleccionar las tareas que reportan mayor utilidad a los recursos disponibles en un periodo de tiempo considerado.

4.4.3. Selección de un único proyecto de entre un conjunto de alternativas excluyentes.

En un nivel de planificación alto, las tareas no tienen por qué ser excluyentes entre sí. Sin embargo, en la realidad, la limitación de recursos conduce a que resulte imposible acometer de manera simultánea todas las tareas y que sea necesario seleccionar unas en detrimento

de otras. Este proceso será la asignación de tareas a cada equipo de trabajo (recursos) o la asignación de recursos (equipos de trabajo necesarios) para cada tarea.

Como se analizó en el capítulo 2, éste sería puramente un problema Problema de Asignación Secuencial de Tareas (JSSP), pero al añadirle los movimientos entre instalaciones distribuidas por la geografía, se resuelve mejor como un problema VRP extendido. En este trabajo se va a plantear un modelo mixto que permita salvar las restricciones de ambos planteamientos.

Utilizaremos un modelo conceptual para encontrar un conjunto de rutas para vehículos que considera recorridos de ida (*linehauls*) y recorridos de vuelta (*backhauls*) separados, múltiples viajes y ventanas de tiempo (VRPB-MTTW). Suponiendo que el producto para

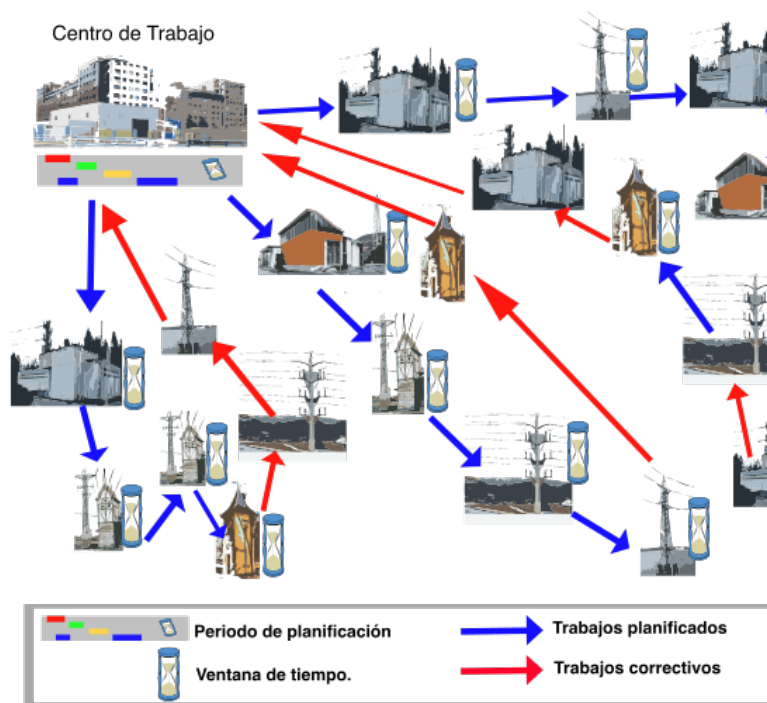


Figura 4.13: Representación esquemática de las rutas entre instalaciones.

los clientes de entrega en la ruta de ida sean los trabajos planificados de tipo preventivo y los productos de la ruta de regreso sean los trabajos de tipo correctivo, no planificados, la demanda de estos últimos no será determinista.

Puede ser necesario que la prioridad de servicio se altere y que se sirva primero a los clientes de regreso.

Pueden existir excesos de capacidad puntuales que deben ser atendidos.

Según [dHMC04], el problema de secuenciación de tareas consiste en la asignación de recursos a diferentes actividades que se ejecutan simultáneamente a lo largo del tiempo. Este problema está presente en múltiples áreas de conocimiento. En el mantenimiento se

trata de un problema fundamental, pues hay que asignar a recursos limitados, equipos humanos de trabajo o máquinas, la realización de las operaciones o tareas necesarias para ejecutar las reparaciones de los sistemas que se quieren mantener. En general, la función objetivo estará relacionada con el tiempo de ejecución de las tareas para minimizar el tiempo total o las esperas, tratando de realizar la máxima cantidad de trabajos con los recursos disponibles, evitando, en lo posible, que queden equipos sin utilizar en algún periodo.

En producción industrial este problema, del tipo NP-Hard, se plantea como se expuso en el apartado 2.6.1. En el mantenimiento de sistemas industriales, existe una dificultad adicional derivada de la indeterminación de la duración de cada tarea op_{ij} . Habrá, por tanto que determinar en qué conjunto E_k se encaja la tarea op_{ij} en función de la capacidad de dicho conjunto al principio del período de programación para acometer más tareas.

4.4.4. **Ámbito de aplicación del modelo**

En este capítulo se expone una aplicación práctica del modelo desarrollado. No obstante, la idea original de este estudio, más allá de resolver un problema laboral específico, es contribuir al incremento de conocimientos científicos sobre el problema clásico de selección de proyectos.

Al seleccionar la metodología de estudio de variables y los modelos matemáticos se prestó especial atención sobre el hecho de no establecer límites a la hora de aplicar las mismas ideas en otros campos de estudio diferentes al del caso práctico elegido. Mantener esta idea en mente, mientras se investigaba, ha permitido explorar soluciones que nunca se contemplarían buscando resolver un problema concreto.

En la identificación de las variables se utilizaron técnicas cualitativas de uso habitual en sociología, pero muy novedosas en la economía y la ingeniería. Se utilizan conceptos de filosofía que, combinados con la informática, abren un universo de posibilidades a la hora de generar conocimiento basado en el razonamiento sobre el caso, técnica de amplio historial en medicina.

En la definición del modelo matemático se combinaron soluciones tradicionales con otras menos convencionales, propuestas a partir de experiencias personales del investigador. Los procesos de la vida (estructura, organización, función y evolución) son muy similares a los procesos de las empresas y los sistemas físicos o virtuales que controlan. Esta similitud solo es posible en un grado alto de abstracción y partiendo de la base de que, tal como se expuso en el apartado 3.3.4, las expresiones matemáticas por sí solas carecen de sentido. Así, un modelo diseñado para explicar un flujo de energía puede ser aplicable para entender un flujo de trabajos como el del caso práctico seleccionado, la selección de una cartera de trabajos de mantenimiento de instalaciones eléctricas. Obviamente, esto requiere un conocimiento preciso de los procesos bajo estudio para interpretar los resultados.

Aplicando esta idea, se utilizaron conceptos probados con éxito en el control de variables físicas (como temperatura, caudal, volumen,...) de procesos industriales para controlar otro tipo de procesos. El modelo de control adaptativo seleccionado como herramienta de ayuda, lleva más de treinta años de aplicación industrial y está avalado por los resultados. Su empleo en la selección de proyectos considerando variables de entorno añade robustez al método de decisión, pues el mecanismo de adaptación va a permitir controlar el proceso, dentro de los límites de operación, en presencia de dichas variables, con independencia de que sean identificables y medibles o no.

Otro catalizador decisivo para llegar a este nivel de abstracción ha resultado ser el concepto "*caja negra*", de amplia difusión en la programación orientada a objetos de programas informáticos.

La solución propuesta, contribuye a aumentar el conocimiento sobre la disciplina estudiada, pero, adicionalmente, aporta nuevos caminos de investigación al incorporar herramientas de otras disciplinas, como la ingeniería, la filosofía y la informática, aplicando conceptos propios de dichas disciplinas en campos alternativos. El empleo de estas técnicas, con origen en distintas disciplinas, ha permitido elaborar el método de tres etapas propuesto. Proporcionar las entradas al modelo a través de una base de conocimiento del dominio que se estudia le añade independencia del propio dominio estudiado. Para su elaboración se han cumplido las características del rigor científico, lo mismo que para identificar las variables y su influencia. Por tanto, este método es robusto, consistente, replicable y adaptable a otros campos de decisión.

Las líneas generales que definen el problema de decisión aplicado a la selección de proyectos considerando variables de entorno en el caso de la cartera de trabajos de mantenimiento de instalaciones eléctricas son:

1. Se requiere la participación de varios niveles de gestión.
2. Involucra varios escenarios.
3. Debe ajustarse a la regulación institucional.
4. Afecta a las necesidades de nueva financiación o puede dirigirla hacia otras inversiones.
5. Condiciona nuevas instalaciones o reformas de las existentes.
6. Existen alternativas con elevado riesgo económico o tecnológico.
7. Las decisiones tendrán consecuencias en el futuro.

Explicadas en un nivel superior de detalle tendríamos:

1. Intervendrán: el Gestor de la red; los responsables de mantenimiento; los responsables de la explotación eléctrica y los responsables de los equipos de trabajo.

2. El escenario variará en función de variables de contorno (meteorología, estacionalidad, . . .); el trabajo podrá ejecutarse o aplazarse para otra ocasión.
3. Tanto trabajos como instalaciones están sujetos a los Reglamentos de instalaciones, Seguridad, etc.
4. Un trabajo de mantenimiento sirve para detectar problemas incipientes o para corregir problemas detectados. Siempre existe la posibilidad de que el alcance de los trabajos este sujeto a variaciones durante el curso del mismo.
5. El mantenimiento de una instalación eléctrica es una pieza clave del crecimiento de la red. Si una instalación no cumple su función deberá ser reemplazada o impedirá el normal funcionamiento del sistema.
6. El abanico de opciones para el decisor va desde no hacer nada hasta el reemplazo de toda una familia de instalaciones. Los riesgos económicos y técnicos serán distintos en virtud del escenario que se contemple.
7. Cuando se presenta un problema de mantenimiento, cualquier decisión condicionarará el futuro. Así, sustituir un elemento ahora evitará averías futuras y esto condicionarará las inversiones durante los próximos años en una determinada instalación. Por contra, esperar para invertir tras la amortización de la instalación incrementará (o no) los costes de reparaciones correctivas.

Puesto que el método ha sido diseñado para ayudar en la decisión de gestores de carteras de proyectos, afectados por condiciones de contorno y evolucionando a lo largo del tiempo en instalaciones distribuidas, se pueden encontrar otros campos de aplicación. Citamos a continuación un par de campos alternativos, explicando los parecidos:

- Gestión de reservas en instalaciones hoteleras.
 1. Intervendrán: Central de reservas; Dirección del hotel; Personal, . . .
 2. El escenario variará en función de variables de contorno (estacionalidad, meteorología, . . .) que afectarán la cantidad de reservas y la ocupación total del hotel.
 3. Reservas e instalaciones están sujetos a normas legales.
 4. Tener más o menos reserva y ocupación afecta a las compras de suministros, contratos de personal eventual, . . .
 5. Un incremento de las reservas puede justificar la ampliación de las instalaciones. Por el contrario una reducción podría obligar a cerrar plantas del hotel.
 6. Para atender las reservas puede ser necesario decidir renovar o ampliar las instalaciones existentes o hacer inversiones para construir nuevas instalaciones.

7. Atender o rechazar reservas son decisiones que condicionaran las reservas y ocupaciones futuras, aunque no haya una ley conocida que defina esta influencia.
- Talleres de fabricación de productos.
 1. Intervendrán: Dirección de la empresa; dirección técnica; jefes de taller,...
 2. El escenario variará en función de variables de contorno: pedidos de clientes en función de necesidades aleatorias, necesidades deterministas,...
 3. Jornadas laborales, instalaciones y productos están sujetos a normas legales.
 4. Tener más o menos pedidos de producción afecta a las compras de suministros, contratos de personal eventual,...
 5. Un incremento de los pedidos puede justificar la ampliación de una cadena de montaje. Por el contrario una reducción podría obligar a cerrarla.
 6. Para atender pedidos puede ser necesario decidir si utilizar las instalaciones existentes o hacer inversiones, contratar o alquilar,...
 7. Atender o rechazar un pedido o invertir en nuevas máquinas son decisiones que condicionarán los trabajos futuros de la empresa.

Parecidos argumentos de similitud se podrían emplear en el control de ocupación de instalaciones hospitalarias; en empresas de distribución de paquetes; en empresas de transporte de personas;...

Esbozamos a continuación las adaptaciones que habría que realizar sobre el modelo propuesto;

1. Definir las ontologías necesarias para identificar el dominio.
2. En la etapa 1 habría que sustituir las variables consideradas y redefinir las cláusulas disyuntivas, así como la fórmula normal conjuntiva para el nuevo caso de estudio.
3. En la etapa 2, el modelo es aplicable directamente sobre el vector de entradas U y salidas Y que definen los proceso del nuevo modelo.
4. En la etapa 3 tampoco es necesario ajustar el modelo para problemas de asignación de rutas. Bastará con escribir las restricciones de manera que definan correctamente el problema.

Capítulo 5

Aplicación del Modelo.

5.1. Implementación de la herramienta de ayuda a la decisión.

En este apartado se presenta un supuesto simplificado de aplicación del modelo a un sistema con una única variable de entrada (los trabajos que hay que gestionar) y una única variable de salida (el presupuesto consumido para realizar esos trabajos), detallando las etapas correspondientes del modelo. Se explica paso a paso la aplicación para realizar, en la parte final, un análisis comparativo, tomando como caso base la situación real.

5.1.1. Etapa de Aceptación.

La primera fase del proceso, la aceptación de cada tarea considerada individualmente, no reviste ninguna complejidad matemática ni conceptual. Simplemente se trata de asignar cada parámetro considerado y comprobar si se cumple la ecuación 4.10. Puesto que los trabajos ya estaban seleccionados, no se analizan aquí casos concretos, ya que, por otra parte, se trata de información propietaria que está sujeta a tratamiento confidencial. Una vez seleccionadas las variables booleanas que definen el problema se incorporan al registro de casos mediante el empleo de simples formularios donde se marque el valor lógico de cada variable. Las figuras 5.1 a 5.6 ilustran esta tarea elemental. Finalizada esta fase, se aplica sobre dichas variables la lógica combinatoria descrita en el apartado 4.4.1 y representada gráficamente en la figura 5.7 ¹.

¹La implementación de esta lógica es una tarea trivial en cualquier lenguaje de programación informática.

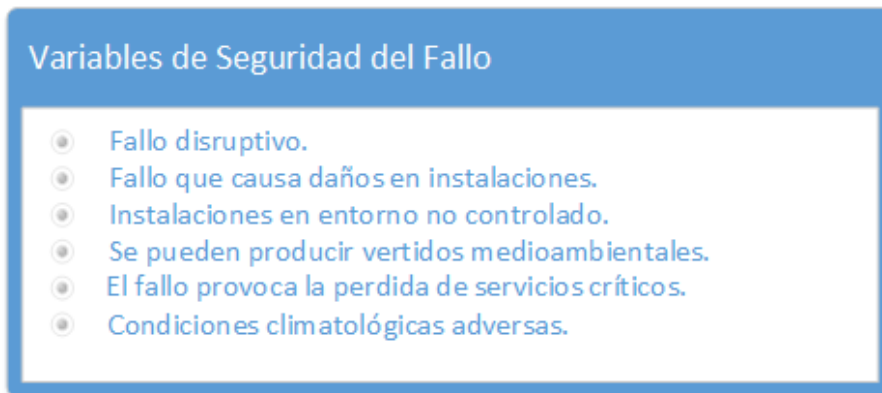


Figura 5.1: Variables que configuran la cláusula de seguridad.

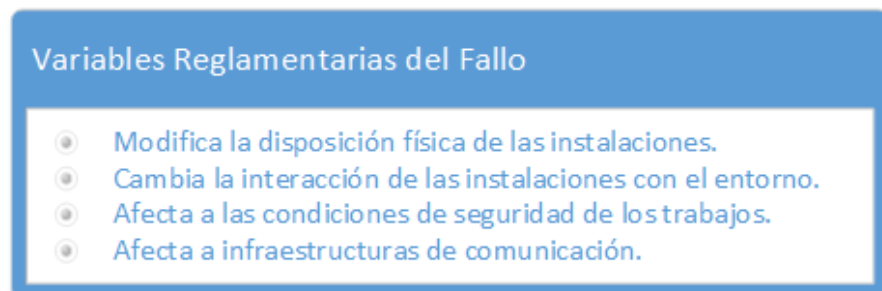


Figura 5.2: Variables que configuran la cláusula de condiciones reglamentarias.

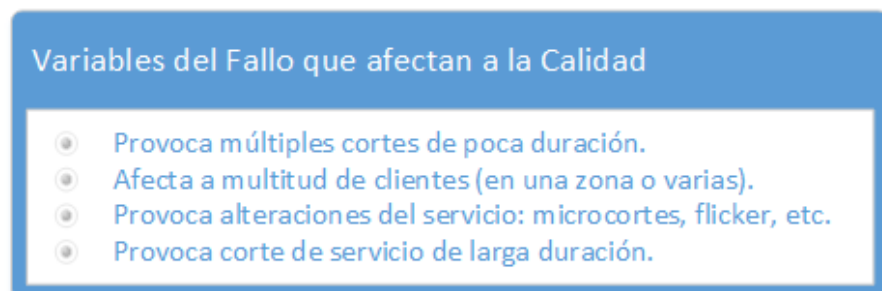


Figura 5.3: Variables que configuran la cláusula de calidad.

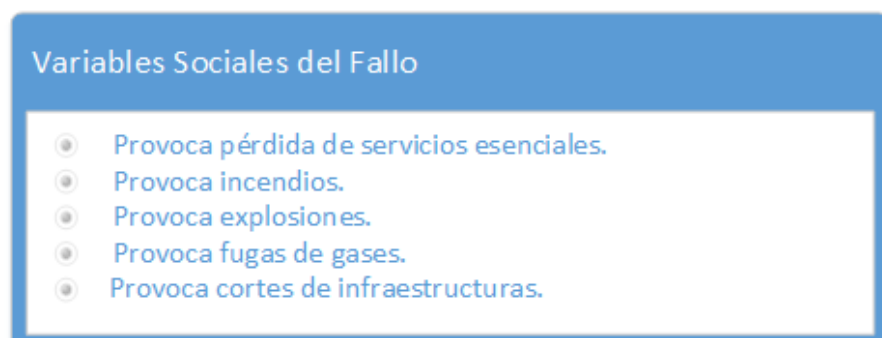


Figura 5.4: Variables que configuran la cláusula de influencia del fallo en la sociedad.

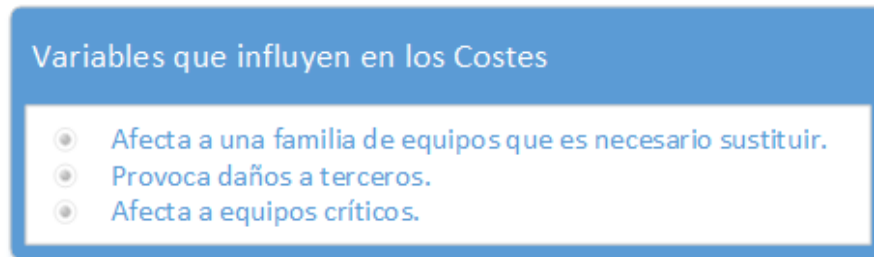


Figura 5.5: Variables que configuran la cláusula de afección a los costes.

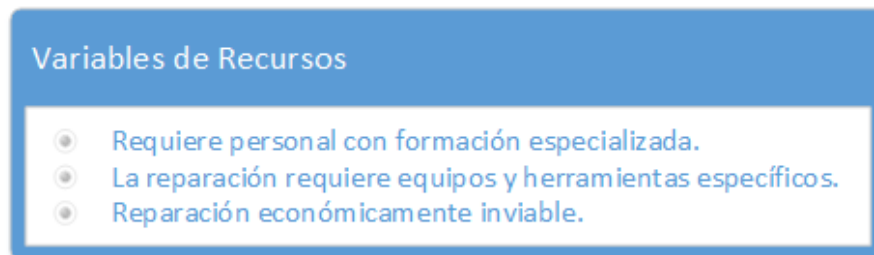


Figura 5.6: Variables que configuran la cláusula de disponibilidad de recursos.

5.1.2. Etapa de Programación.

En el sistema real de un sistema eléctrico, el problema tendrá múltiples variables tanto de entrada como de salida. Sin embargo, el modelo matemático es exactamente el mismo substituyendo las ecuaciones simples por matrices de ecuaciones. Partiendo de esta premisa, se explicará el proceso seguido para una única variable, tanto de entrada como de salida.

Tomamos como variable de salida el presupuesto asignado para un periodo de planificación. La variable de entrada serán los costes de cada tarea. Al intentar controlar el presupuesto, la variable de control son las tareas que se ejecutan. Si se necesita incrementar el presupuesto incurrido, habrá que ejecutar más tareas y, si se necesita reducirlo, alguna de las tareas será pospuesta².

Para modelar las tareas como flujo de actividad, se define una tarea por su coste de realización, ya sea en tiempo o en dinero (pues la conversión entre ambas es proporcional con una constante conocida) y por la ubicación donde es necesario realizarla, pues ese dato condicionará las etapas posteriores.

El modelo se construye analizando los datos de trabajos de una empresa cuya actividad es el mantenimiento de instalaciones durante el año 2014. Los datos que se muestran están codificados por motivos de confidencialidad. Se analiza una muestra de 940 trabajos de varias tipologías a partir de los cuales se determinan los parámetros del modelo. Esos trabajos se distribuyeron a lo largo de los 365 días del año, que serían los periodos de

²Se consideran las tareas como un depósito de almacenamiento, que dispone de una válvula de salida sobre la que es posible aplicar acciones de control para abrirla o cerrarla.

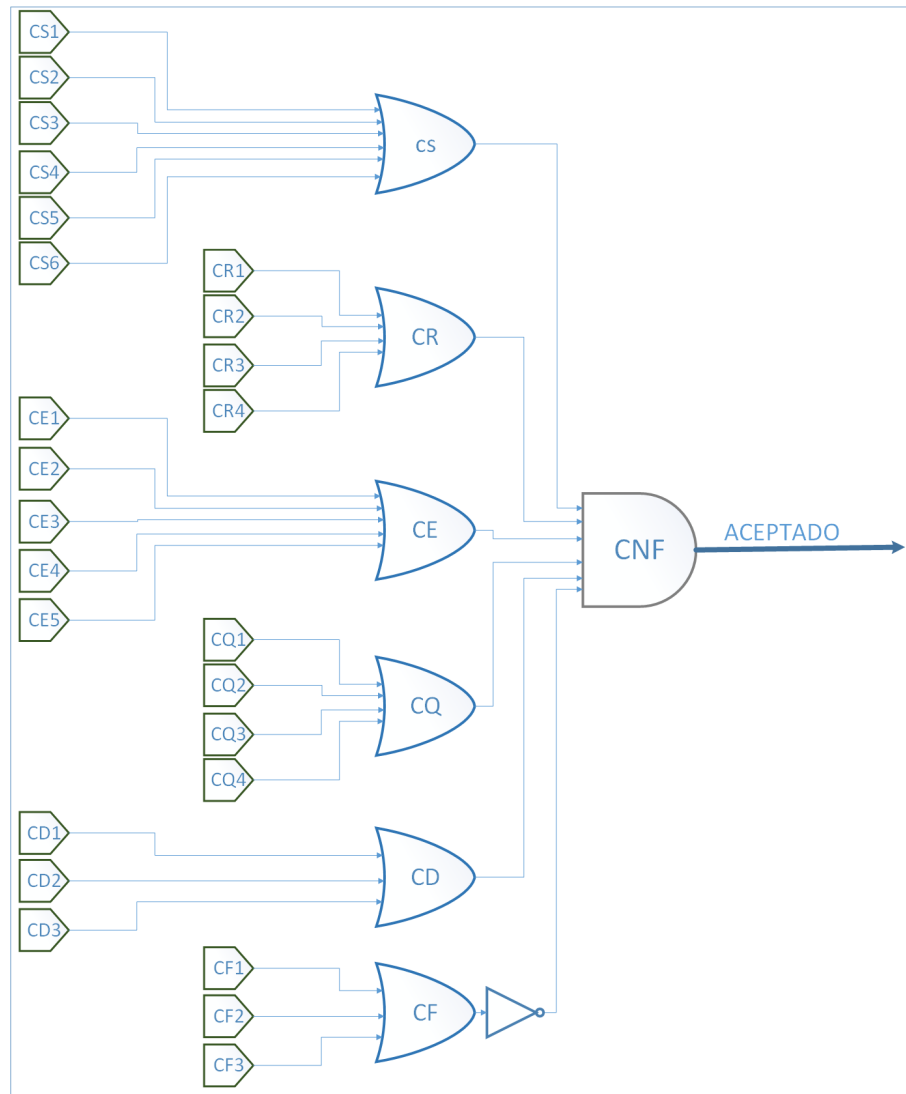


Figura 5.7: Lógica binaria que permite obtener la fórmula normal conjuntiva a partir de las variables de entrada.

programación teóricos. Por motivos de visibilidad, se van a utilizar en este capítulo las semanas como instantes de planificación, con lo que se reduce a 53 periodos de planificación o instantes de muestreo.

La figura 5.8 muestra el diagrama de Gantt de las tareas seleccionadas en cada periodo. Con los valores de cada periodo se define un modelo adaptativo, donde la función $u(k)$ es la variable de entrada que describe el flujo de tareas necesarias para obtener la salida presupuestaria deseada. Se expresa:

$$u(k) = \hat{u}(k|k) = \frac{y_r(k + \lambda|k) - \sum_{i=1}^{\hat{n}} \hat{e}_i^{(\lambda)} y(k + 1 - i) - \sum_{i=2}^{\hat{m}} \hat{g}_i^{(\lambda)} u(k + 1 - i)}{\hat{h}^{(\lambda)}} \quad (5.1)$$

con

$$\hat{e}_i^{(\lambda)} = \hat{e}_1^{(\lambda-1)} \hat{a}_i + \hat{e}_{i+1}^{(\lambda-1)}; \quad i = 1, \dots, \hat{n}; \quad j = 2, \dots, \lambda \quad (5.2)$$

$$\hat{g}_i^{(\lambda)} = \hat{e}_1^{(\lambda-1)} \hat{b}_i + \hat{g}_{i+1}^{(\lambda-1)}; \quad i = 1, \dots, \hat{m}; \quad j = 2, \dots, \lambda \quad (5.3)$$

$$\hat{h}^{(\lambda)} = \hat{g}_1^{(\lambda)} + \hat{g}_1^{(\lambda-1)} + \dots + \hat{g}_1^{(1)} \quad (5.4)$$

siendo $\hat{e}_i^{(1)} = \hat{a}_i; \quad i = 1, \dots, \hat{n}; \quad \hat{e}_{\hat{n}+1}^{(\lambda-1)} = 0; \quad j = 1, \dots, \lambda;$

$\hat{g}_i^{(1)} = \hat{b}_i; \quad i = 1, \dots, \hat{m}; \quad \hat{g}_{\hat{m}+1}^{(\lambda-1)} = 0; \quad j = 2, \dots, \lambda;$

La trayectoria deseada de la variable de salida seguiría una curva como la mostrada en el figura 5.9. La trayectoria de salida del modelo para la variable "presupuesto", en realidad siguió la curva representada en 5.10.

Con los datos de ambas curvas vamos a explicar el modelo matemático que se utilizará para tomar las decisiones en un entorno condicionado por variables externas, donde la estrategia adaptativa es de suma importancia. La ecuación que representa esta dinámica de proceso será:

$$y(k) = \sum_{i=1}^n a_i y(k - i) + \sum_{i=1}^m b_i u(k - i) + \sum_{i=1}^p c_i w(k - i) + \Delta(k) \quad (5.5)$$

Para cada instante de control se calculan los parámetros a_i y b_i .

Estos parámetros se obtienen resolviendo un sistema lineal de ecuaciones cuyo objetivo es conseguir el valor de salida deseado, cambiando los parámetros de la ecuación a partir de los valores de entrada conocidos.

Para ilustrar el funcionamiento de la estrategia de control, se van a presentar los resultados de la ejecución de los pasos de cálculo correspondientes a unos pocos instantes de control. Puesto que el presupuesto anual siempre se inicia en 0, el primer instante produce valores de parámetros muy diferentes a los de otros instantes. Consideraremos entonces que durante los primeros instantes el modelo y el sistema real son coincidentes y nos centraremos en el instante de control $k = 5$ para explicar el proceso de cálculo.

The image shows a large spreadsheet with a grid of data. The columns are labeled with letters (A through Z) and the rows are numbered from 181 to 331. The data cells contain various values, and several cells are highlighted in red, green, and purple, indicating specific data points or states. The spreadsheet appears to be a detailed record of work or tasks used for testing a model.

Figura 5.8: Vista de los trabajos utilizados para probar el modelo.

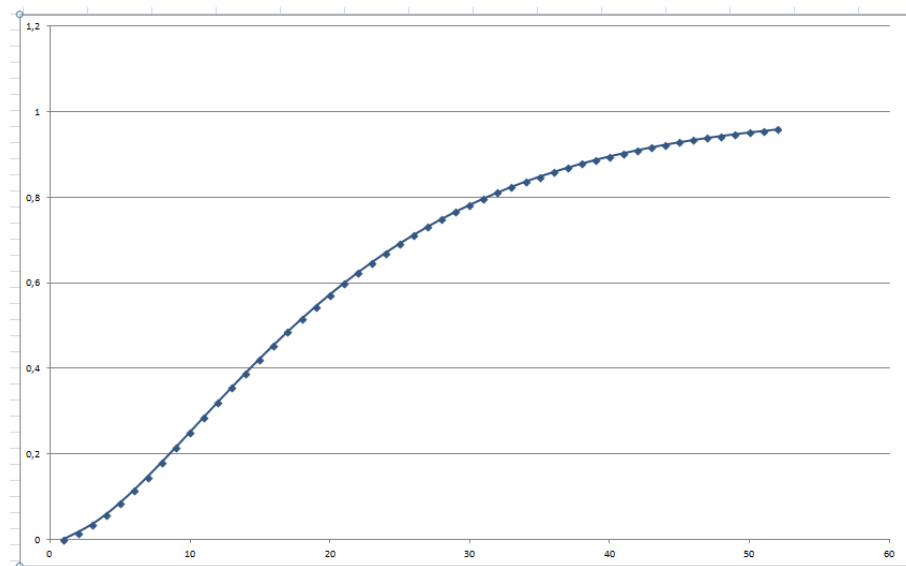


Figura 5.9: Curva de la trayectoria deseada para el presupuesto anual de los trabajos.

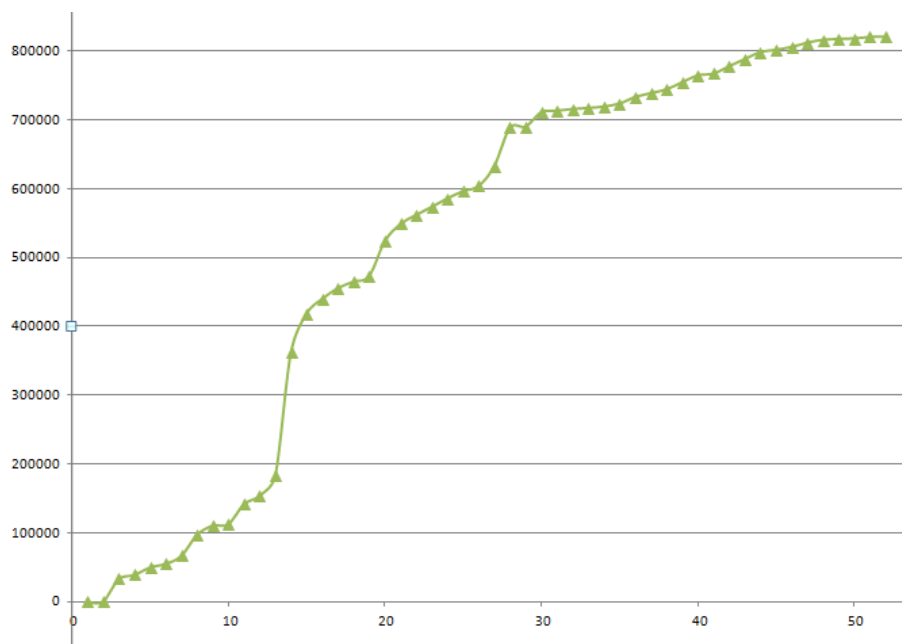


Figura 5.10: Trayectoria de salida del modelo teórico para la variable de salida.

Supondremos, por simplificar la explicación, que no hay errores de modelización y que los valores α_i son iguales a los valores a_i y lo mismo ocurre con los valores β_i y b_i .³ En el instante $k = 4$ los valores de los parámetros del proceso serán los mostrados en la tabla 5.1. Podremos entonces calcular la salida esperada en el instante $k = 5$ utilizando

a_i	b_i
$a_1 = 2864404,882$	$b_1 = 2864404,882$
$a_2 = 0,007602863$	$b_2 = 0,282683332$
$a_3 = 0,470834316$	$b_3 = 5,437841806$
$a_4 = 0,335405229$	$b_4 = 0,532688522$

Cuadro 5.1: Parámetros del modelo en el instante $k=4$.

dichos parámetros y las salidas y entradas en los instantes anteriores, según la ecuación 5.5 resultando $y(5|4) = 61022$

A partir de esta salida deseada, la ley de control 5.1 calcula la acción de control sobre la entrada, que resulta ser 8138. Los trabajos mostrados en la tabla 5.11 son los que materializan ese valor.

TRABAJO	CoordX	CoordY	MODELO	TIPO	CLASE
49	512593	4641777	20	79	960
60	524038	4669256	20	79	960
61	540856	4670422	20	79	960
62	544217	4659866	20	79	960
65	515641	4662334	24	77	251
111	567504	4809978	20	78	174
124	578311	4643659	20	76	148
126	578311	4643659	21	1004	661
134	552853	4795399	21	1004	662
135	512637	4742230	21	78	982
149	531221	4698500	21	77	200
170	531221	4698500	24	1088	902
173	605505	4720135	21	77	961
186	633853	4753845	21	76	189
186	628956	4737181	21	76	189
186	645005	4735565	21	76	189
190	569356	4694307	21	78	966
191	592429	4746590	21	78	982
193	502398	4713715	21	77	200
196	567132	4817679	21	78	982
215	569356	4694307	21	79	964
216	538226	4748879	21	78	966
226	629350	4643639	21	78	982

Figura 5.11: Listado de trabajos seleccionados para el instante de muestreo $k=5$

Para seleccionar estos trabajos se aplica el algoritmo de selección secuencial de tareas 4.16 desarrollado en el apartado 4.4.2. Se analizan secuencialmente todos los trabajos,

³Incluir estos errores aporta únicamente complejidad de cálculo, pues la operativa conceptual es exactamente la misma.

siendo aceptados o rechazados por el algoritmo. El proceso se detiene cuando se consigue seleccionar la cantidad de candidatos necesarios para cumplir los objetivos.

Las tareas aceptadas se marcan para la planificación del instante k considerado.

Las tareas rechazadas se mantienen en la pila de programación indefinidamente, hasta que son ejecutadas. En cada instante de planificación se vuelven a considerar todas las tareas aceptadas en la primera etapa del proceso.

Los parámetros del modelo adaptativo se recalculan en cada punto de muestreo con el objetivo de obtener una nueva predicción de la salida para el instante de muestreo siguiente.

Las variables externas condicionan la evolución del sistema. Durante el periodo de estudio considerado, muchos trabajos se vieron afectados por ellas. Los gestores tomaron las decisiones necesarias para replanificarlos y ejecutarlos en otro instante temporal donde las condiciones fuesen favorables.

Con independencia de cuáles fuesen las causas de las variaciones de la planificación, el modelo puede ajustar el flujo de entrada para conseguir la salida deseada. Como se puede apreciar en la figura 5.12,

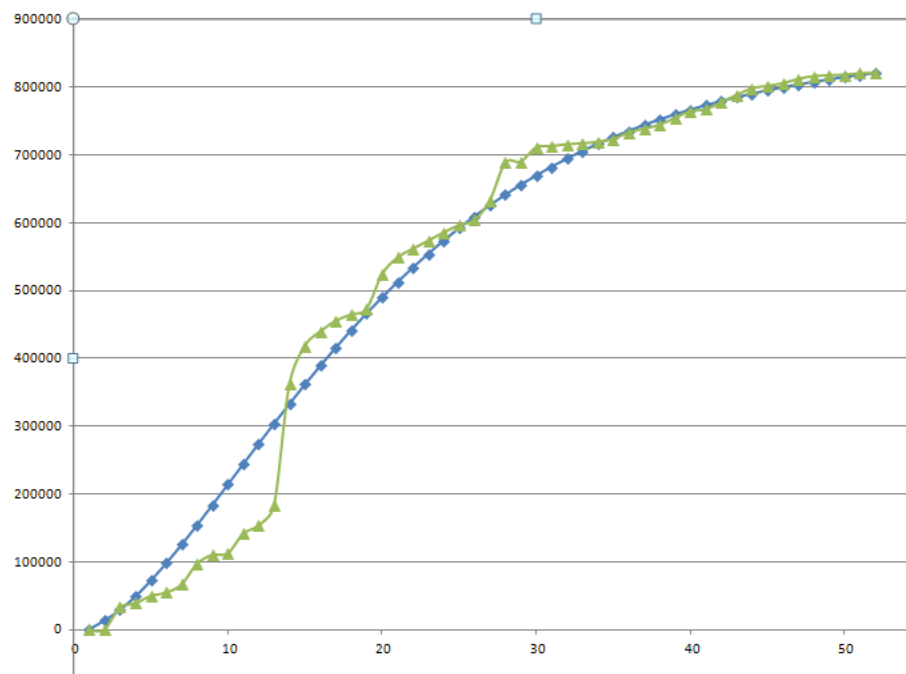


Figura 5.12: Curvas de salida real y modelada superpuestas

durante los primeros intervalos de planificación se produce un retraso en la realización de las tareas. Este retraso está justificado probablemente por la estacionalidad de dichas tareas. Son las primeras semanas del año y, por tanto, periodo invernal. Esta estacionalidad produce varios efectos que afectan al sistema. Los trabajos en instalaciones a la intemperie están afectados por el clima. Ciertas inclemencias del tiempo, como temporales de viento o

nieve, producen la suspensión de los trabajos. En el caso de factores climatológicos menos intensos, lluvia moderada o frío, no se llega a la suspensión pero sí condiciona la duración de los trabajos debido a las necesarias medidas de protección contra dichos elementos. Los trabajos duran más y, por tanto, el ritmo del sistema se ralentiza.

Por otro lado, en la época invernal, los trabajadores tienen más propensión al absentismo laboral debido a las enfermedades propias de dicha estación: gripes, resfriados, . . . Este tipo de absentismo no permite un ajuste rápido de la plantilla de trabajo, pues suelen ser imprevistos y de corta duración, con lo que conllevan la suspensión de los trabajos planificados para ese equipo de trabajo.

Con independencia de lo razonables que parecen ambas causas, pueden existir otras razones menos evidentes que también contribuyen al retraso de las tareas.

En el nivel de programación, conocer las causas que provocan el retraso o modificación de cada trabajo, cuando el volumen es elevado, puede suponer un tiempo de proceso excesivo para la agenda del gestor. Además, puede suceder que, incluso aunque pueda hacerlo, el valor añadido que aporte este conocimiento sea nulo o irrelevante para la empresa. Por esta razón, disponer de un modelo que permita hacer predicciones, con independencia de las causas raíz que estén detrás de cada modificación del desvío de la trayectoria deseada para las variables objeto de control, será una pieza clave para ayudar a los gestores en la toma de decisiones.

El modelo propuesto trata de llevar el sistema hacia la salida de consigna deseada. Las desviaciones, tanto positivas como negativas han de ser corregidas. Los parámetros que marcan la curva de trayectoria de la variable de salida van a adaptarse a las perturbaciones externas, sea cual sea su origen, y tomar las medidas necesarias para conducir de nuevo su valor a la senda deseada.

En la planificación de trabajos sobre instalaciones distribuidas por la geografía, existen muchos factores cuyo comportamiento no es modelable. Por citar algunos:

- Influencia humana.
 - Las personas que componen un equipo de trabajo, están sujetas a múltiples variables que condicionan su comportamiento.
 1. Pueden encontrarse indispuestas momentáneamente por temas de salud.
 2. Problemas personales que afectan al tiempo de dedicación o al rendimiento en el trabajo.
 3. Incertidumbres a la hora de realizar un trabajo por desconocimiento de las técnicas o métodos necesarios.
 4. Despistes en las rutas de acceso a los lugares.
 5. Necesidades de desplazamientos adicionales para atender imprevistos.

- La presencia de otras personas, ajenas al equipo de trabajo, también condicionan el comportamiento y la duración de los trabajos.
 1. Para realizar un trabajo en un lugar donde hay concurrencia de personas, las labores de delimitación y señalización de los trabajos son más intensas e incluso pueden obligar a la suspensión de cierto tipo de trabajos.
 2. Una sola persona que transite por la zona donde se realiza el trabajo, también puede afectar a los trabajos pues puede plantear cuestiones para cuya respuesta sea necesario interrumpir los trabajos, aunque sea temporalmente.
 3. La influencia del resto de las personas en los desplazamientos es clara: atascos, accidentes de tráfico, ...
- Influencia de animales.
 - La presencia de animales en los lugares de trabajo puede provocar retrasos y prolongaciones de las tareas. Cuando esto ocurre los trabajos se ven alterados hasta que se neutralizan los animales, generando además tareas adicionales no previstas inicialmente. ⁴

Los factores externos suponen en la realidad restricciones a la realización de los trabajos. Con el modelo adaptativo propuesto, no es necesario contemplar estas restricciones dentro del modelo, pues sea cual sea su efecto, serán tenidas en cuenta en el siguiente periodo de planificación. Incorporando las restricciones internas, debidas a las limitaciones del sistema, el modelo dispone de suficiente información para proporcionar una predicción aceptable. Estas restricciones serán:

- Capacidad de carga de trabajo. La cantidad de trabajos que se puede programar estará limitada por el número de trabajos que pueden ser realizables por los equipos y medios de trabajo disponibles para ese periodo. Esto puede afectar en dos vertientes:
 - Por un lado tendremos la capacidad de los equipos de trabajo humanos. Los especialistas en cada tipo de trabajo tienen que repartirse las tareas a lo largo de los sucesivos periodos de planificación.
 - Las herramientas necesarias para determinados trabajos pueden tener un coste demasiado alto como para que su uso no sea intensivo. Por lo tanto, estos equipos no estarán disponibles para todo instante y será necesario programar un uso secuencial.
- Limitaciones por incompatibilidad de trabajos. Cuando se realizan trabajos en una instalación eléctrica es necesario dejarla fuera de servicio, afectando a terceros y es

⁴Perros, ganado agresivo, avispa, serpientes, ... , pueden estar presentes prácticamente en cualquier lugar de la geografía con una baja probabilidad.

necesario contar con ellos a la hora de planificar los trabajos. Este punto es especialmente importante cuando hay múltiples trabajos en una zona, pues las redundancias del sistema pueden cubrir una pérdida limitada del sistema. Si se dejan fuera de servicio demasiadas instalaciones se producirán efectos sobre los clientes del sistema.

Cuando se intentan recuperar los retrasos producidos por las variables externas de los primeros periodos, es necesario tener estas restricciones en cuenta. Como en todo sistema lineal, las restricciones pueden ser:

- $<$ La capacidad de carga de trabajo debe ser menor que el valor disponible de horas de trabajo disponibles para los equipos
- \leq El número de instalaciones sobre las que se pueden realizar trabajos tiene que ser menor o igual que un valor dado.
- $>$ Los equipos de trabajo disponibles deben disponer de trabajos. Puesto que existen trabajos pendientes, resulta antieconómico tener fuerza de trabajo parada.

Las restricciones de capacidad establecen un límite a la salida calculada por el modelo. Sobre la curva global vamos a centrar la explicación en unos breves momentos de la misma. En los primeros instantes, que se pueden apreciar con detalle en la figura 5.13, se puede ver cómo el modelo en el instante $k = 2$ predice una salida para el instante $k|k - 1 = 3$ de valor $y(3|2) = 44665$. Las limitaciones internas o externas del sistema, impiden que se alcance ese valor. El valor real en el instante $k = 3$ de la salida es $\hat{y}(3) = 33211$. Al incorporar este valor al modelo, se recalcula la trayectoria deseada proyectada para ese instante TDP_3 .

Durante los instantes posteriores, la tendencia se mantiene y los valores de salida no alcanzan las previsiones de las TDP_{k-1} . Los parámetros del modelo evolucionan para adaptarse a estas situaciones y llevar la variable de salida hacia el valor de consigna. La tabla 5.2 muestra los valores de los parámetros a_i y b_i entre los instantes $k = 2$ y $k = 7$

a_i	b_i
$a_2 = 0,007602863$	$b_2 = 0,282683332$
$a_3 = 0,470834316$	$b_3 = 5,437841806$
$a_4 = 0,335405229$	$b_4 = 0,532688522$
$a_5 = 0,401544335$	$b_5 = 0,592481014$
$a_6 = 0,400739561$	$b_6 = 0,532042855$
$a_7 = 0,461121399$	$b_7 = 0,586237474$

Cuadro 5.2: Parámetros del modelo en el instante $k=7$.

que permiten el cálculo de la salida prevista según la ley 5.1.

En el instante $k = 14$ se produce un cambio en la tendencia y se comienzan a recuperar los trabajos perdidos. Este cambio podría tener connotaciones estacionales por coincidir con la llegada de la primavera y la mejoría de la climatología. Sin embargo, la razón real

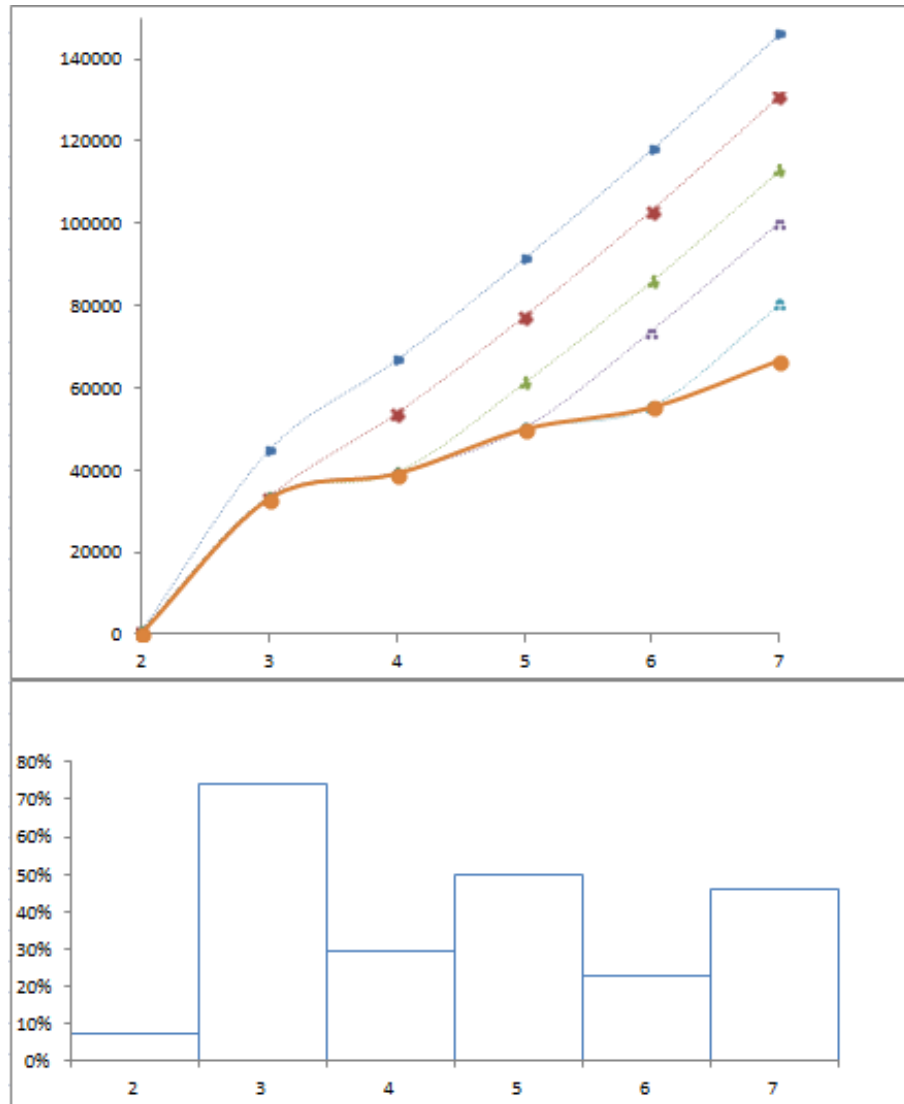


Figura 5.13: Detalle de las adaptaciones del modelo a los cambios en la salida esperada.

fue una decisión gerencial para incorporar temporalmente a más personal con el objetivo de corregir los retrasos.

El modelo adaptativo asume sin problemas esta eventualidad y se ajusta a la nueva situación como se puede apreciar en la figura 5.14.

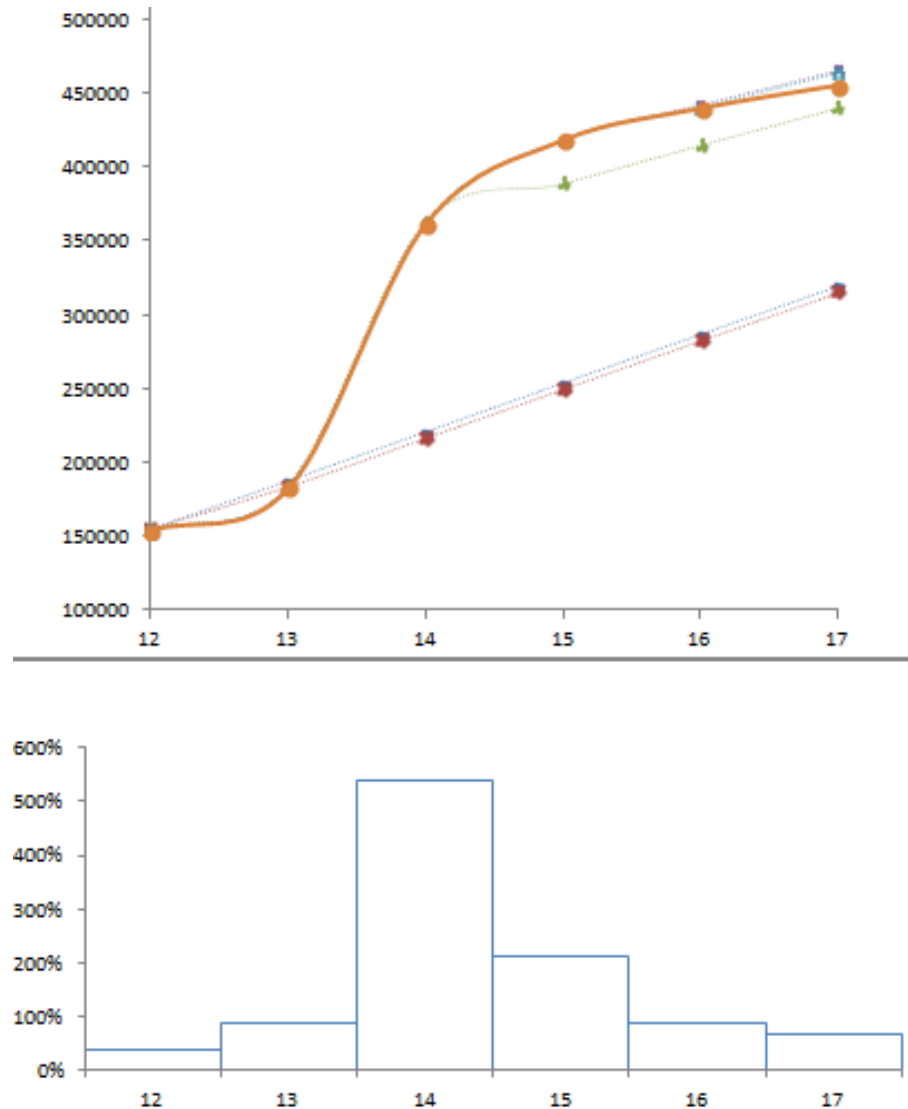


Figura 5.14: Detalle de la adaptación del modelo para el instante de control $k = 15$.

El incremento en la salida que se produce en el instante $k = 14$ está ocasionado por la programación de un 500% del trabajo normal para cada periodo. Esto provoca un cambio de la TDP_{14} , que produce un salto brusco en las curvas. Puesto que la nueva capacidad de trabajo es temporal, para evitar que el modelo adaptativo mantenga la tendencia de crecimiento generada por el salto es necesario incorporar la restricción de la capacidad de trabajo que en el instante $k = 15$ no podrá superar el 200% .

Con esa restricción, la TDP_{14} proporciona una predicción para el valor de salida $y(15|14) = 26850$ que se corresponde con los trabajos mostrados en la tabla 5.15.

TRABAJO	CoordX	CoordY	MODELO	TIPO	CLASE
446	540476	4797406	21	1004	662
446	540476	4797406	21	1004	662
446	540476	4797406	21	1004	662
446	540476	4797406	21	1004	662
446	540476	4797406	21	1004	662
446	540476	4797406	21	1004	662
446	540476	4797406	21	1004	662
446	540476	4797406	21	1004	662
446	540476	4797406	21	1004	662
446	540476	4797406	21	1004	662
446	540476	4797406	21	1004	662
446	540476	4797406	21	1004	662
446	540476	4797406	21	1004	662
446	540476	4797406	21	1004	662
446	540476	4797406	21	1004	662
446	540476	4797406	21	1004	662
446	540476	4797406	21	1004	662
446	540476	4797406	21	1004	662
446	540476	4797406	21	1004	662
446	540476	4797406	21	1004	662
446	540476	4797406	21	1004	662
515	597373	4682665	20	76	148
532	650351	4746015	20	77	959
543	540476	4797406	21	1004	662
543	540476	4797406	21	1004	662
545	502398	4713715	24	1088	901
546	522565	4675869	24	1088	901
552	645005	4735565	21	78	982
554	524038	4669256	21	77	200
555	596391	4763734	21	77	961
565	502398	4713715	24	78	976

Figura 5.15: Trabajos seleccionados por el modelo para el periodo de programación $k = 15$.

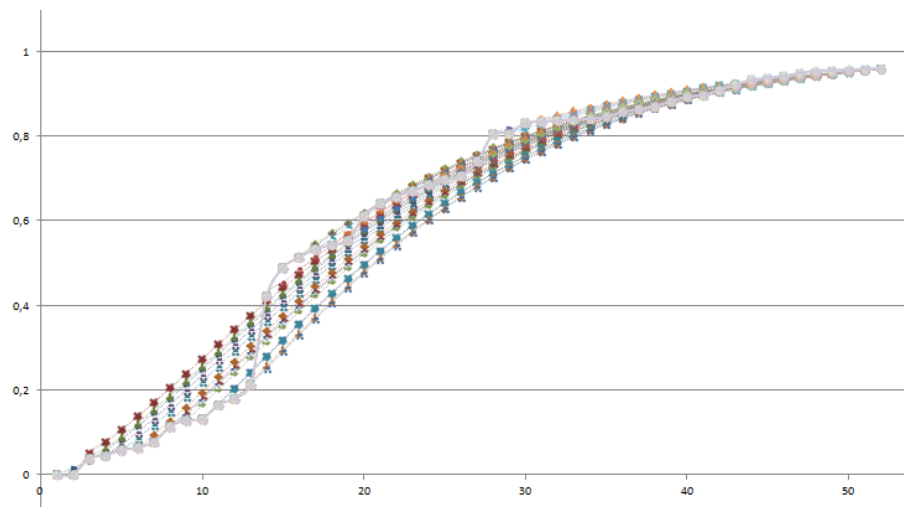
De nuevo, para seleccionar estos trabajos se aplica el algoritmo de selección secuencial de tareas 4.16, analizando sucesivamente todos los trabajos que permanecen en ese momento pendientes de programación.

Los valores de los parámetros a_i y b_i durante los instantes anteriores a $k = 14$ se muestran en la tabla 5.3.

Al realizar todos los cálculos, en cada instante de planificación, se obtiene una familia de curvas que representan las TDP_i . La información implícita de cada estado se incorpora al modelo de modo que la tendencia hacia el valor de consigna sigue una aproximación estable y continua a lo largo del tiempo.

En la figura 5.16 se muestran todas las trayectorias deseadas proyectadas que se generaron para finalmente obtener el valor de consigna deseado, cumpliendo el presupuesto.

a_i	b_i
$a_{10} = 0,529449527$	$b_{10} = 0,509170785$
$a_{11} = 0,656249991$	$b_{11} = 0,626626552$
$a_{12} = 0,61413307$	$b_{12} = 0,539834956$
$a_{13} = 0,686091777$	$b_{13} = 0,585529599$
$a_{14} = 1,198547183$	$b_{14} = 0,966739912$
$a_{15} = 0,788876957$	$b_{15} = 0,538273951$

Cuadro 5.3: Parámetros del modelo en el instante $k=14$.Figura 5.16: Vista de las trayectoria TDP_k generadas para cada periodo de programación.

Esta aplicación simplificada, permite observar cómo se puede controlar una variable con independencia de los factores que la alteren, mediante el control de las variables de entrada para llevar la variable de salida hacia el valor de consigna deseado.

En una situación real, existen múltiples variables de salida que interesa controlar. Una herramienta como la propuesta permite hacerlo con independencia de cuantas variables se traten de controlar. La ley de control 4.11 posibilita el mismo tratamiento, ya sea para una o para n variables. El problema tiene mayor complicación matemática, pero la complejidad se mantiene. Las variaciones entre variables y las influencias de variables externas están incorporadas del modelo adaptativo sin necesidad de elaborar modelos de comportamiento para cada variable.

5.1.3. Etapa de Asignación.

La tercera etapa del proceso consiste en la asignación de cada tarea a un equipo de trabajo.

En esta fase se utiliza un modelo matemático de planificación de rutas de vehículos.

Las instalaciones están distribuidas a través de la geografía. En la figura 5.17 se muestra un gráfico con las coordenadas Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) de algunas instalaciones seleccionadas para realizar el estudio. La primera parte

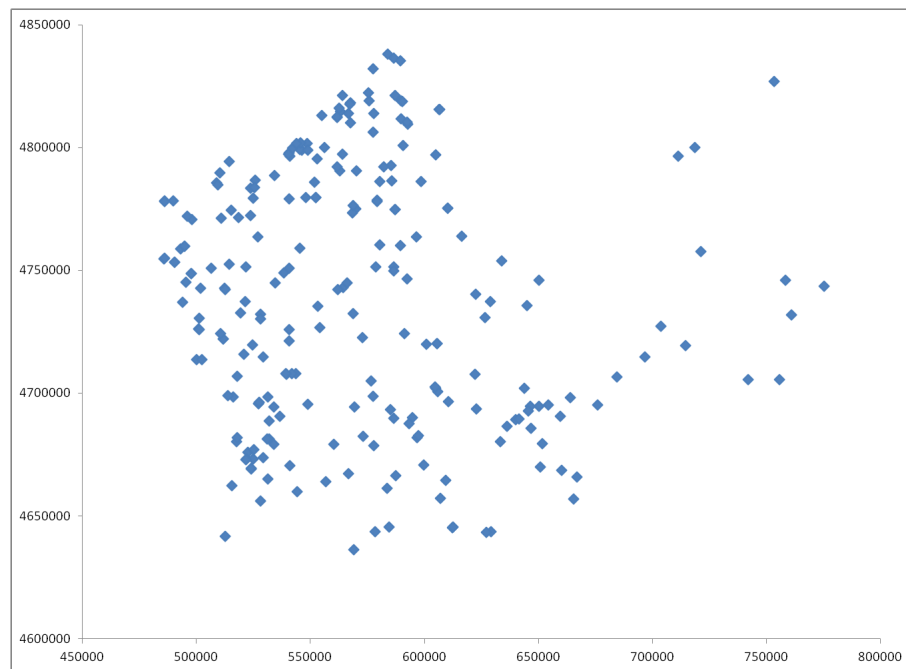


Figura 5.17: Posiciones geográficas de las instalaciones.

de la ruta es atender la demanda de los clientes. En la segunda, se puede realizar otra actividad ⁵.

La analogía entre trabajos sobre instalaciones y entrega de productos a clientes se sustenta sobre los siguientes paralelismos:

- Un cliente que atender es una instalación sobre la que hay que hacer un trabajo.
- La demanda del cliente es la cantidad de recursos que es necesario emplear para realizar la tarea en cada instalación.
- Un vehículo es un equipo de trabajo con todos los recursos humanos y materiales para realizar la tarea requerida en una instalación.
- Un centro de reparto es la base de trabajo de los equipos.

Los trabajos sobre instalaciones eléctricas afectan a terceros. Debido a ello, para minimizar los efectos de dicha afección, es necesario pactar un periodo temporal durante el cual se realizarán los trabajos. Esa será la ventana de tiempo que se utilizará en el modelo. Dicha ventana de tiempo se establece al inicio del periodo de programación. Es importante cumplir con esta restricción y ajustar los recursos necesarios, pues, si se asignan demasiados trabajos a un equipo y luego se producen retrasos en la llegada a la instalación del cliente, se producirán incumplimientos de programación con el correspondiente coste económico. Por otro lado, si, para garantizar el cumplimiento de la ventana de tiempo, se asignan pocos trabajos repartidos entre muchos equipos de trabajo, habrá tiempos improductivos para cada equipo, originando de nuevo costes económicos no deseados.

Las funciones objetivo del modelo son:

- Minimizar el número de equipos de trabajo movilizados en cada periodo de programación.
- Minimizar el tiempo total de las rutas.
- Minimizar el rango de tiempos de las rutas.

Las variables de decisión son:

- Número de rutas
- Secuencia de servicio de los clientes en cada ruta y recorrido.
- Ventana de tiempo de servicio para cada instalación.
- Marca de tiempo del primer servicio en la primera instalación de la ruta.
- Marca de tiempo del último servicio en la última instalación de la ruta.

Los parámetros serán:

⁵En el problema clásico, en la ruta de ida se entregan los productos y en la ruta de vuelta se recogen las devoluciones de productos.

- Número de instalaciones que se programan para cada equipo en el instante inicial de la programación.⁶
- Número de instalaciones que no estaban previstas en el periodo inicial de programación y que, por causas imprevistas, es necesario atender con urgencia. Este tipo de trabajos puede existir o no para cada equipo de trabajo.⁷
- Demanda de recursos necesarios en cada instalación para atender los trabajos necesarios en la misma.
- Distancias entre cada instalación y la base de trabajo.
- El horizonte de planificación.

Cada equipo de trabajo puede realizar varias rutas en cada periodo. Las restricciones que habrá que tener en cuenta son:

- Cada ruta comienza y termina en la base de trabajo.
- El horizonte de planificación que indica el inicio y el final de la actividad del equipo de trabajo.
- La cantidad de recursos que es preciso asignar a cada instalación para realizar los trabajos sobre ella. Esta cantidad es determinista y conocida.
- Las tareas programadas son prioritarias sobre las no programadas. Se supone que las urgencias serán atendidas por equipos dedicados expresamente y que paralizar las tareas previstas genera costes. Esta restricción no es rígida, pues la prioridad del servicio se puede alterar sobre la marcha.
- Los trabajos sobre cada instalación no son excluyentes. Si se asigna un trabajo en una instalación a un equipo, pueden realizarse otros trabajos sobre dicha instalación durante este periodo de planificación.
- Los recursos demandados para hacer una tarea sobre una instalación deben ser aportados por un único equipo de trabajo.
- Cada equipo debe respetar su jornada laboral, pudiéndose programar exclusivamente trabajos con marcas de tiempo dentro de la misma. Esta restricción no es rígida, pues pueden existir excesos de capacidad puntuales que deben ser atendidos.

Vamos a ilustrar la mecánica de calculo sobre los datos seleccionados por el paso anterior para el instante de programación $k = 21$. En ese instante, la salida del modelo adaptativo selecciona los trabajos mostrados en la tabla 5.18⁸.

El problema de asignación de tareas a un equipo se plantea de la siguiente manera:

⁶Éstos serán los clientes de ida (*linehauls*) en el modelo clásico VRP.

⁷Estos serían los clientes de regreso (*backhauls*) en el modelo clásico.

⁸Los datos referentes a los parámetros de cada tarea en una instalación se muestran codificados por motivos de confidencialidad de la información.

TRABAJO	CoordX	CoordY	MODELO	TIPO	CLASE
658	607037	4657097	20	77	955
746	592429	4746590	21	76	189
757	544217	4659866	25	76	258
758	544217	4659866	25	76	258
759	544217	4659866	25	76	258
760	544217	4659866	25	76	258
761	544217	4659866	25	76	258
762	544217	4659866	25	76	258
765	544217	4659866	25	76	258
767	529345	4673751	20	78	174
768	525183	4676951	20	78	174
778	531242	4665130	20	76	148
778	531242	4665130	20	76	148
779	531242	4665130	20	76	148
779	531242	4665130	20	76	148
781	572826	4722581	20	76	148
781	572826	4722581	20	76	148
783	572826	4722581	20	76	148
783	572826	4722581	20	76	148
799	572826	4722581	21	1004	662
799	572826	4722581	21	1004	662
804	531242	4665130	21	1004	662
804	531242	4665130	21	1004	662
805	597373	4682665	25	78	978
808	578311	4643659	24	1088	903
810	600991	4719959	21	76	189
810	622121	4707617	21	76	189
810	604659	4702490	21	76	189
810	628956	4737181	21	76	189
813	524038	4669256	21	78	966
817	572826	4722581	21	1004	662
817	572826	4722581	21	1004	662
819	517799	4681961	24	76	248
826	600991	4719959	20	76	148
826	600991	4719959	20	76	148
839	573065	4682539	21	78	966
883	600991	4719959	21	1004	662
883	600991	4719959	21	1004	662
884	531242	4665130	21	76	190
884	531242	4665130	21	76	190

Figura 5.18: Trabajos seleccionados por el modelo para el periodo $k = 21$.

- Índices:
 - t representa el viaje de cada vehículo $t = 1, 2, \dots$
 - r representa la ruta $t = 1, 2, \dots$
 - k representa el orden de visita de cada vértice en una ruta o viaje. $k = 1, 2, \dots$
 - i representa cada nodo del grafo. $i = 0$ representa la base de operaciones, $i = 1, 2, \dots, n$ representa los trabajos programados, $i = n + 1, n + 2, \dots, n + m$ representa los trabajos imprevistos.
- Variables de decisión:
 - NT Número de viajes de cada vehículo.
 - $NR(t)$ Número de rutas que tiene que realizar un vehículo para atender todos los trabajos en las instalaciones que le sean asignadas.
 - $NL(t, r)$ Número de trabajos que hay que realizar en la ruta r del viaje t .
 - $NL_p(t, r)$ Número de trabajos de tipo programado hay que realizar en la ruta r del viaje t .
 - $NL_c(t, r)$ Número de trabajos de tipo correctivo hay que realizar en la ruta r del viaje t .
 - $L(t, r, k)$ Ubicación visitada en la posición k del viaje t durante la ruta r .
 - $\alpha(t, r, k)$ Tiempo de llegada a la posición del nodo k en la ruta r del viaje t .
 - $\alpha^e(t, r, k)$ Tiempo límite inferior de llegada a la posición del nodo k en la ruta r del viaje t .
 - $\alpha^l(t, r, k)$ Tiempo límite superior de llegada a la posición del nodo k en la ruta r del viaje t .
 - $\delta(t, r, k)$ Tiempo de partida a la posición del nodo k en la ruta r del viaje t .
 - $\delta^e(t, r, k)$ Tiempo límite inferior de partida a la posición del nodo k en la ruta r del viaje t .
 - $\delta^l(t, r, k)$ Tiempo límite superior de partida a la posición del nodo k en la ruta r del viaje t .
 - $\sigma(t, r, k)$ Tiempo de inicio del trabajo en la posición del nodo k en la ruta r del viaje t .
 - $\sigma^e(t, r, k)$ Tiempo límite inferior de inicio del trabajo en la posición del nodo k en la ruta r del viaje t .

- $\sigma^l(t, r, k)$ Tiempo límite superior de inicio del trabajo en la posición del nodo k en la ruta r del viaje t .
 - $\omega(t, r, k)$ Tiempo de espera en el nodo k en la ruta r del viaje t .
 - $TP(t, r)$ Carga de trabajo programado en la ruta r del viaje t .
 - $TC(t, r)$ Carga de trabajo correctivo en la ruta r del viaje t .
 - $TL(t, r, k)$ Carga de trabajo necesario en la instalación k en la ruta r del viaje t .
 - $s(t, r, k)$ Tiempo necesario en la instalación k en la ruta r del viaje t para realizar los trabajos.
- Parámetros:
- $T(i, j)$ Tiempo de viaje entre el nodo i y el nodo j
 - $e(i)$ Inicio de la ventana de tiempo en el nodo i .
 - $l(i)$ Fin de la ventana de tiempo en el nodo i .
 - $p(i)$ Demanda de trabajos programados en el nodo i . Siendo la demanda del nodo base $d(0) = 0$
 - $c(i)$ Demanda de trabajos correctivos en el nodo i . Siendo la demanda del nodo base $d(0) = 0$
 - Q Capacidad de trabajo de cada equipo.
 - γ Tiempo de servicio
 - n Número de instalaciones en las que hay que hacer trabajos programados
 - m Número de instalaciones en las que hay que realizar trabajos correctivos.
 - $pvp(t, r, k)$ Coste por unidad de tiempo de los recursos que hay que emplear en la instalación k durante el viaje t de la ruta r .
- Objetivos:
- CTR Coste total de las rutas.
 - NV Número de vehículos.
 - TDT Duración total de los viajes.

Cada ubicación $l(t, r, k)$ para el nodo visitado en la posición k del viaje t de la ruta r se refiere a un nodo, de forma que $L(t, r, k) = i$. Los trabajos programados que se realizan en una ruta son:

$$TP(t, r) = \sum_{k=1}^{NL(t,r)-1} p(t, r, k) \quad (5.6)$$

Los trabajos correctivos que se realizan en una ruta son:

$$TC(t, r) = \sum_{k=1}^{NL(t,r)-1} c(t, r, k) \quad (5.7)$$

La capacidad de trabajo de un equipo tiene que cumplir las siguientes restricciones:

$$TP(t, r) \leq Q \quad (5.8)$$

$$TC(t, r) \leq Q \quad (5.9)$$

Los instantes temporales se pueden obtener por cálculo diferencial. Tiempo límite inferior de llegada a la posición del nodo k en la ruta r del viaje t :

$$\alpha^e(t, r, k) = \delta^e(t, r, k) + T(L(t, r, k), L(t, r, k)) \quad k = 1, 2, \dots, NL(t, r) \quad (5.10)$$

Tiempo límite inferior de inicio del trabajo en la posición del nodo k en la ruta r del viaje t :

$$\sigma^e(t, r, k) = \text{máx}\{\alpha^e(t, r, k), e(L(t, r, k))\} \quad k = 1, 2, \dots, NL(t, r) \quad (5.11)$$

Tiempo límite inferior de partida a la posición del nodo k en la ruta r del viaje t :

$$\delta^e(t, r, k) = \sigma^e(t, r, k) + s(L(t, r, k)) \quad k = 1, 2, \dots, NL(t, r) \quad (5.12)$$

Con $\alpha^e(t, 1, 0) = 0$ $\alpha^e(t, r, 0) = \delta^e(t, r - 1, NL(t, r))$ La amplitud de la ventana de tiempo será:

$$\delta^e(t, r, k) \leq I(L(t, r, k)) \quad k = 1, 2, \dots, NL(t, r) \quad (5.13)$$

Tiempo necesario en la instalación k en la ruta r del viaje t para realizar los trabajos. Trabajos programados:

$$s(L(t, r, k)) = p(L(t, r, k)) \quad (5.14)$$

Trabajos correctivos:

$$s(L(t, r, k)) = c(L(t, r, k)) \quad (5.15)$$

El tiempo de espera en cualquier ubicación se obtiene

$$\omega(t, r, k) = \begin{cases} e(L(t, r, k)) - \alpha(t, r, k) & \text{si } \alpha(t, r, k) < e(L(t, r, k)) \\ 0 & \text{si } \alpha(t, r, k) \geq e(L(t, r, k)) \end{cases} \quad (5.16)$$

, $k = 1, 2, \dots, NL(t, r)$

El tiempo de duración del viaje t se define como la diferencia entre el instante inicial de servicio para el viaje, el tiempo de llegada a la posición $k = 0$ del viaje y el instante de

servicio final, que será el instante de partida de la base para el siguiente viaje.

$$DT(t) = \delta(t, NR(t), NL(t, r)) - \alpha(t, 1, 0) \quad k = 1, 2, \dots, NL(t, r) \quad (5.17)$$

El tiempo total de viaje, será la suma de todos los tiempos de duración:

$$TDT = \sum_{t=1}^{NT} DT(t) \quad (5.18)$$

El coste total de las rutas se obtendrá multiplicando la duración de cada ruta por el coste por unidad de tiempo de los recursos empleados en la misma.

$$CTR = \sum_{v=1}^{NV} \sum_{t=1}^{NT} \sum_{r=1}^{NR(t)} \sum_{k=1}^{NL(t,r)} (\delta(t, r, k) - \alpha(t, r, k - 1)) pvp(t, r, k) \quad (5.19)$$

Cada vehículo solo puede atender un viaje, por lo tanto:

$$NV = NT \quad (5.20)$$

Los objetivos son tres:

1. Minimizar el número de vehículos empleados (NV).
2. Minimizar el tiempo total, trabajos más desplazamientos (TDT)
3. Minimizar el coste total de las rutas (CTR)

La formulación genérica de estos objetivos será:

$$Z = \{\text{mín } NV, \text{mín } CTR, \text{mín } TDT\} \quad (5.21)$$

A cada objetivo se le asigna un peso para establecer una prioridad entre los objetivos en caso de ser inalcanzables simultáneamente. De esta manera, si P_1, P_2 y P_3 reflejan los pesos de cada objetivo, cuando $P_1 > P_2 > P_3$ el primer objetivo tendrá más prioridad que el segundo y el segundo tendrá más importancia que el tercero.

La función multiobjetivo pasará a ser entonces:

$$\text{mín } Z = P_1 \Delta CTR + P_2 \Delta TDT + P_3 \Delta NV. \quad (5.22)$$

Varias técnicas han sido desarrolladas para resolver VRP. [O⁺11] demostró que el VRP es un problema NP-Hard. Por consiguiente, VRP se resuelve generalmente mediante el uso de aproximaciones heurísticas y meta-heurísticas.

El algoritmo de Inserción Secuencial es un método muy utilizado en la solución de problemas de rutas de vehículos. En este trabajo, se aprovechan las cualidades de facilidad de uso y configuración de restricciones para implementarlo. Este algoritmo no proporciona

una solución óptima, pero permite alcanzar soluciones factibles, que son suficientes en esta fase.

Se compone de las siguientes fases:

- Fase 0: Se introducen todos los parámetros y se inicializan los conjuntos de instalaciones que hay que visitar:
 - $i = 1, 2, \dots, n$, donde se realizarán trabajos preventivos.
 - $i = n + 1, n + 2, \dots, n + m$, instalaciones con trabajos correctivos pendientes.
- Fase 1: Se crea un viaje y una ruta del mismo, $t = 1$ y $r = 1$, partiendo desde la base.
- Fase 2: Se selecciona la primera de las instalaciones, cuyos trabajos están pendientes de atender del conjunto de trabajos preventivos $i = 1, 2, \dots, n$, utilizando reglas de asignación simples. Si $r \neq 1$ se continúa con la fase 4. Este paso se repite mientras haya trabajos preventivos de instalaciones pendientes de asignar. Cuando todos los trabajos preventivos en instalaciones se han asignado, se continúa en la fase 9.
- Fase 3: Se comprueba la viabilidad de la ventana de tiempo para la instalación seleccionada. Si es factible se asigna la instalación a la ruta. Se calcula la disponibilidad de realizar más trabajos en esta ruta al finalizar la de la instalación i . Si hay disponibilidad se pasa al paso 5. Cuando la ventana de tiempos no es viable se crea un nuevo viaje $t + 1$ y una ruta partiendo de la base para ese viaje $r = 1$, la instalación queda sin asignar y se reinicia el proceso en la fase 2.
- Fase 4: Se elige la instalación sin asignar que genera la menor duración en la nueva ruta. Se organizan todas las instalaciones que pueden ser insertadas. Se comprueba la disponibilidad para realizar trabajos. Si existe se retorna a la fase 3. Cuando no exista disponibilidad se continuará en la fase 7.
- Fase 5: Se actualiza la información sobre el viaje t , la ruta r y el subconjunto de instalaciones pendientes de visitar i . Mientras queden instalaciones por visitar se regresa a la fase 2. Cuando se vacíe el conjunto i , se continuará en la fase 6.
- Fase 6: Se calculan los parámetros del viaje y la ruta creadas. Se elige la instalación sobre la que haya que realizar trabajos correctivos que genera la mínima duración del viaje dentro del conjunto $i = n + 1, n + 2, \dots, m$. Se actualiza la información sobre la duración del viaje y se continúa en la fase 7.
- Fase 7: Se comprueban las instalaciones en las que hay que realizar trabajos correctivos del conjunto $i = n + 1, n + 2, \dots, m$. Si todas están asignadas, se continúa en la fase 9. Se comprueba la disponibilidad de tiempo y recursos para la ruta existente. Si es posible se asigna y se continúa en la fase 8. En caso contrario, se crea una nueva ruta $r + 1$ y se repite esta fase 7.

- Fase 8: Se comprueba la viabilidad de realizar los trabajos correctivos dentro de la ventana de tiempo asignada para la instalación. Si es viable, se asigna y se calcula la disponibilidad remanente. Se repite la fase 7 hasta finalizar la asignación de instalaciones a la ruta.
- Fase 9: Se calcula el recorrido y el tiempo de duración de la ruta creada. Se elige el tiempo mínimo de duración. Cuando todas las instalaciones han sido asignadas se detiene el proceso.

Aplicando todas las restricciones y datos conocidos al conjunto de trabajos que hay que realizar durante el instante de programación $k = 21$ se obtienen los siguientes resultados:

- $NV = 4$
- $CTR = 18825$
- $TDT = 100\%$

La representación gráfica de estas rutas se puede observar en la figura 5.19. Figura

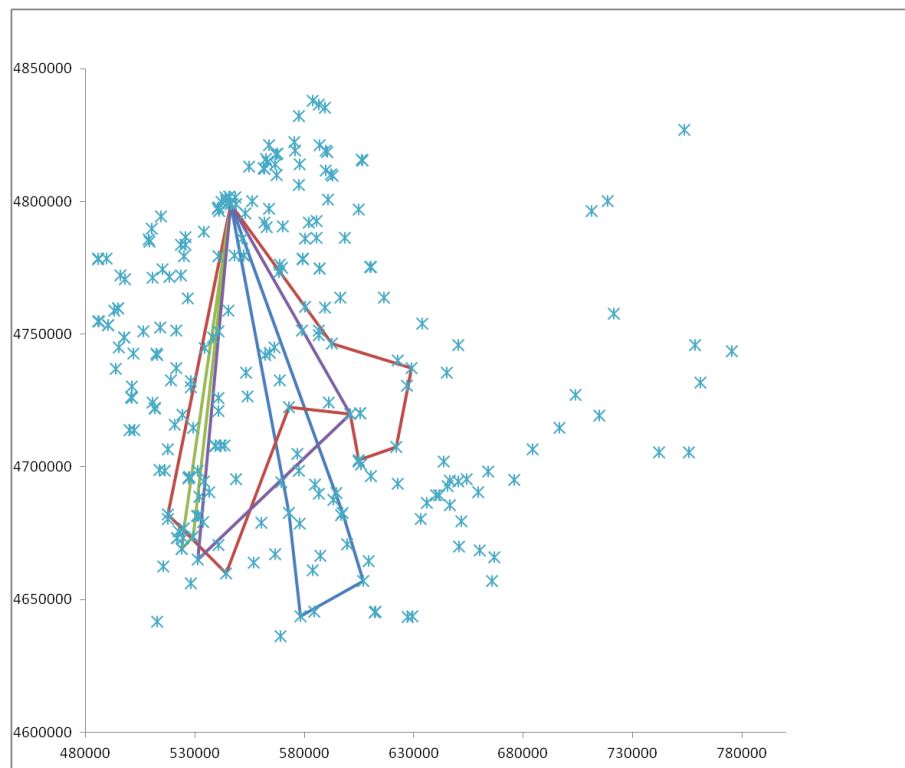


Figura 5.19: Rutas definidas por el modelo para los trabajos del periodo $k = 21$.

5.1.4. Análisis comparativo: Modelo teórico frente a caso real.

Uno de los objetivos fundamentales de esta investigación era definir un sistema de ayuda a la decisión. Este objetivo se habrá cumplido si las ayudas proporcionadas por el sistema facilitan la toma de decisiones por parte de los gestores de trabajos.

Para comprobar la bondad de este sistema de tres etapas se realizó un análisis comparativo entre los resultados aportados por el sistema y el caso real. Las decisiones tomadas por los gestores durante el año 2014 para programar los trabajos en cada periodo estarían lógicamente influenciadas por sus experiencias, conocimientos e inquietudes personales en cada momento.

En la elaboración del modelo se ha intentado incorporar el modo de razonamiento humano y aprovechar las mejoras aportadas por los sistemas matemáticos.

Analizaremos la repercusión de cada etapa sobre las decisiones de los gestores de proyectos.

Primera Etapa. La primera etapa del modelo permite sistematizar un proceso que actualmente es totalmente subjetivo. Resulta difícil fijar un valor cuantitativo de mejora, especialmente en términos económicos. A nivel cualitativo, el estudio del caso práctico tampoco permite hacer valoraciones de resultados. Sin embargo, las ventajas de este método son las siguientes:

- Permite establecer un marco de referencia para comparar situaciones.
- Facilita la incorporación de nuevos datos en la toma de decisiones.
- Aumenta la memoria de la organización. Una vez analizados los casos y tipologías de trabajos, se registran de forma permanente en las ontologías definidas. Las necesidades de trabajos se analizan por comparación con la base de datos de conocimiento y se mantendrán en la memoria organizativa hasta que sean asignados a un periodo de programación. Se evita así el problema de la memoria a corto plazo en las personas y se puede establecer una escala de prioridades más objetiva.

Etapas de Programación y Asignación. En la programación real durante el año 2014 de los trabajos seleccionados existen conceptualmente las etapas de programación y asignación. Ambas aparecen cuando se decide que un trabajo se realizará durante un periodo y cuál será el equipo de trabajo que lo realizará.

Sin embargo, resulta imposible separar estas etapas para analizarlas comparativamente con las etapas del modelo teórico. Por esta razón, se realiza la comparación de manera conjunta y esto permite obtener valores cuantitativos para evaluar la bondad del modelo como herramienta de ayuda a la decisión.

El modelo teórico se basa en los siguientes principios:

1. Etapa de programación.

- a) Se fija la trayectoria deseada para la evolución de la variable de salida que se pretende controlar.
- b) Se actúa sobre las variables controlables de entrada.
- c) Se mide la salida obtenida.
- d) Se corrige la trayectoria y las actuaciones sobre la entrada

2. Etapa de asignación.

- a) Se definen las rutas necesarias para completar todos los trabajos seleccionados para el periodo.
- b) Se asignan a los equipos mejor preparados para realizarlas.

Puesto que la variable que se muestra en la aplicación práctica es el presupuesto asignado para realizar los trabajos, se puede realizar una comparación muy sencilla observando los resultados presentados en la gráfica de 5.12 frente a la curva real de evolución del presupuesto.

En la gráfica 5.20

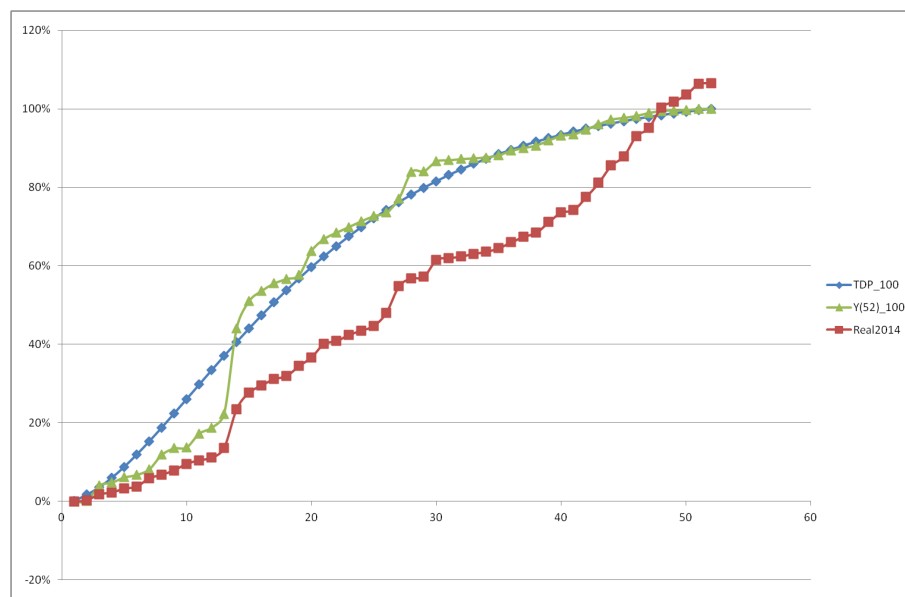


Figura 5.20: Curvas superpuestas: Ideal Planificación (TDP_100); Salida Modelo (Y(52)_100); Real periodo (Real2014).

se pueden apreciar las importantes diferencias entre la evolución real y la evolución proporcionada por el modelo.

Centrándonos en la respuesta a los cambios, podemos apreciar cómo el modelo teórico responde con rapidez a la presencia de los refuerzos cuando en el instante $k = 14$ se toma la decisión de reforzar los equipos de trabajo.

Sin embargo, en la curva real la respuesta es menos pronunciada. Se tarda más tiempo en asignar trabajos a los nuevos recursos y su presencia resulta necesaria durante un periodo más prolongado de tiempo.

En el modelo teórico se fija la trayectoria deseada para tratar de aprovechar los recursos disponibles en los periodos más propicios. Así, la curva durante el primer trimestre del año, época invernal, asigna un menor volumen de presupuesto, pues los trabajos tienen más dificultades de ejecución por la menor duración de los días, la climatología adversa y otros factores propios de esa época.

Durante el segundo y tercer trimestre, primavera y verano, las condiciones de trabajo son más propicias. Los días son más largos y las condiciones climatológicas más favorables para los trabajos sobre instalaciones dispersas por la geografía, muchas de las cuales están a la intemperie.

Durante el cuarto trimestre, otoño e invierno de nuevo, se ralentizaría el presupuesto por el empeoramiento habitual de la meteorología en esa época.

Esto permite comparar los resultados en diferentes momentos del año, como se puede ver en la tabla 5.4. Los resultados arrojados por el modelo siguen con mayor fidelidad la referencia fijada por la trayectoria deseada.

Trimestre	Semana	Incurrido		
		Deseado	Real	Modelo
Primer trimestre	12	35 %	23 %	42 %
Segundo trimestre	26	72 %	48 %	74 %
Tercer trimestre	39	90 %	71 %	92 %
Cuarto trimestre	52	100 %	107 %	100 %

Cuadro 5.4: Comparativa de avance trimestral del presupuesto: Teórico, real y obtenido del modelo propuesto

Finalmente, en la fila de la tabla 5.4 que refleja los datos del tercer trimestre, se observa que, en las condiciones deseadas, durante el último trimestre se incurriese tan solo un 10 % del presupuesto. Sin embargo, en la situación real, todavía quedaba pendiente de incurrir un 29 %.

Los trabajos en las épocas invernales tienen mayores requerimientos técnicos, económicos y de seguridad por las condiciones expuestas anteriormente. Es de esperar que un mayor número de trabajos realizados en esta época supongan un incremento de los costes para la realización de los mismos.

Por otro lado, la distribución real de los trabajos, siguiendo la trayectoria cuasi lineal representada, ocasionó situaciones antieconómicas como tener que realizar múltiples visitas a una misma instalación lejana.

Como dato significativo se remarca que el 25 % de los trabajos se realizaron en instalaciones que requerían de otras intervenciones en plazos inferiores a 2 semanas.

Estos puntos, sumados a otros menos evidentes, tuvieron repercusión sobre el presupuesto real y provocaron que, finalmente, el cierre del año se desviase un 7% al alza sobre el planificado.

El modelo desarrollado detectó las situaciones donde se producían duplicidades de desplazamientos a la misma instalación y las corrigió cuando la carga de trabajo para una ruta y la capacidad de los equipos de trabajo cualificados lo permitían.

El ajuste del modelo a la curva deseada es prácticamente total, llevando la variable de salida del presupuesto hasta el 100%. En esta aplicación práctica se consigue un ahorro del 7% frente a la situación real.

Capítulo 6

Conclusiones

6.1. Cuestiones planteadas y resumen de la investigación.

Al comenzar esta Tesis se plantearon las siguientes cuestiones para elaborar una herramienta de ayuda a la decisión para gestores de mantenimiento de instalaciones eléctricas:

- ¿Qué variables debo tener en cuenta al analizar este problema?
- ¿Es necesario realizar acciones de mantenimiento para resolver este problema?

Si la respuesta es positiva habrá que responder a estas dos preguntas adicionales:

- ¿Cuándo será el mejor momento para realizarla?
- ¿Quién y con qué medios la podrá ejecutar?

Estas cuestiones encajan perfectamente dentro de la formulación clásica de selección de proyectos:

- Aceptación o no del proyecto considerado individualmente.
- Selección de un único proyecto de entre un conjunto de alternativas excluyentes.
- Selección de un subconjunto de alternativas dentro de un conjunto de proyectos aceptables debido a la existencia de restricciones activas en los recursos disponibles para acometer varios proyectos.

Se ofrece a continuación un resumen de la investigación:

Durante la redacción del presente documento se ha realizado la lectura de gran cantidad de trabajos de investigación en diversos campos de estudio. A pesar de que el tema de la selección de proyectos es un problema clásico, en el mundo laboral y, especialmente, en el mundo del mantenimiento de instalaciones eléctricas, los estudios existentes no aportaban ninguna referencia que tratase en profundidad las cuestiones planteadas.

En las fases tempranas de la investigación, se localizaron y analizaron los trabajos relacionados en alguna medida con el problema que se estudia:

- Selección de proyectos con variables de entorno.
- Selección de tareas de mantenimiento.
- Análisis de variables.
- Indicadores de rendimiento de procesos.
- Herramientas de ayuda a la decisión.
- Modelado de procesos.

También se revisó la normativa aplicable, que, en el caso que nos ocupa, presenta dos aspectos:

- *Marco regulatorio*. Establece las condiciones reglamentarias que rodean a las instalaciones y los trabajos de mantenimiento que hay que hacer sobre ellas.
- *Normativas Técnicas*. Fijan las condiciones técnicas de equipos y elementos que componen un sistema. También normalizan métodos de análisis de factores asociados a las instalaciones: a) Calidad. b) Fiabilidad. c) Fallos. d) Modos de Fallo.

Esta tarea tiene múltiples ventajas:

1. Permite innovar con la certeza de que la idea no ha sido previamente estudiada.
2. Ayuda a conocer qué aspectos ya están resueltos.
3. Permite establecer puntos de partida sólidos desde los cuales continuar investigando.

Durante los años que ha durado la investigación, se han producido avances significativos en campos muy útiles para esta Tesis. Este es el caso del estudio del entorno y de las ontologías de dominio, tradicionalmente limitadas al mundo informático. Y también del estudio del caso, un método utilizado en la investigación médica y epidemiológica, que está siendo aplicado con éxito en muchos otros campos. La adopción de estos conceptos ha facilitado la solución de uno de los principales problemas a los que se enfrenta un decisor: la disponibilidad y calidad de los datos.

Las variables de entorno introducen componentes dinámicos en los sistemas, presentando, por tanto, mayor complejidad de análisis que un sistema estático. De nuevo aquí, los avances de la inteligencia artificial han puesto al alcance del investigador numerosas herramientas que permiten disponer de soluciones aplicables en otros ámbitos.

La selección de tareas de mantenimiento, es un tema de gran interés en ingeniería, sin embargo, la mayor parte de la literatura publicada al respecto se orienta hacia la determinación de la política de mantenimiento óptima y solo en los últimos años han comenzado a aparecer estudios dedicados al fallo de equipos desde la óptica de la gestión.

La cantidad de referencias dedicadas al análisis de variables internas de un sistema es inmensa. Sin embargo, la mayor parte se dedican al análisis estadístico de las mismas. Las referencias expuestas en el capítulo 2 son una muestra interesante de cómo se está orientando el mundo científico para caracterizar las variables externas a un nivel de deducción lógica que permite obtener conclusiones incluso aunque la población muestreada solo contenga un individuo.

La unión de esta deducción lógica con un modelo de proceso permite fijar las bases para elaborar una herramienta de ayuda a la decisión. El modelado matemático de procesos está explorado en profundidad. Nos quedamos con una corriente de gran difusión durante los últimos años que permite analizar un proceso sin necesidad de conocer exactamente todos y cada uno de los mecanismos que lo gobiernan. Esta idea, tomada del mundo de los sistemas digitales, permite tratar un proceso como si se tratara de una caja negra de la que únicamente se conocen las entradas y las salidas. Analizando cómo se interconectan se puede inferir una ley de control de las salidas a partir de los valores de entrada que, coincida o no con la real, explicará el comportamiento del proceso al aplicarle unas entradas controladas.

La identificación de las salidas del mantenimiento, entendido como un proceso, se ha conseguido a partir de la aplicación de varios métodos de investigación y de la normativa orientada a los indicadores de rendimiento del mantenimiento.

6.2. Contribuciones del estudio.

Las contribuciones de esta Tesis se enmarcan en dos vertientes:

Desde el punto de vista metodológico, evidencia los siguientes aspectos relevantes:

- Defiende la importancia de conectar los modelos teóricos con la realidad que se quiere modelar. Elaborar un modelo matemático, tan sencillo como sea posible, que explique un fenómeno real tiene dos aspectos fundamentales:
 1. Es necesario estudiar en profundidad el proceso que se quiere modelar. Determinar los datos que aportan ese conocimiento es una labor de gran importancia, pues una mala elección puede invalidar cualquier conclusión posterior.
 2. Una vez definidos los datos, la búsqueda de un modelo reducido óptimo es esencial, pues es necesario contrarrestar la tendencia natural de las personas de utilizar las herramientas conocidas, o modelos más complicados, simplemente por no esforzarse en aplicar reglas de simplificación o razonamiento lateral que permitan llegar a las mismas conclusiones sin apenas realizar cálculos.

Este enfoque pragmático es crucial para el diseño de herramientas de ayuda a la decisión que sean útiles para los decisores.

- Integra varios campos de investigación: a) ingeniería, b) filosofía, c) ciencias sociales, para elaborar un modelo de uso general en el campo de la toma de decisiones sobre un amplio espectro de problemas de selección de proyectos. Las tres etapas del modelo suponen el cierre del círculo en problemas con componente recurrente, como es el caso del mantenimiento. Este círculo se inicia con la selección de un proyecto y se cierra cuando se concluyen las acciones asociadas al mismo, en un proceso dinámico que no tiene fin. Las dos etapas iniciales son de mayor generalidad y aplicables directamente sobre diversos temas simplemente modificando las variables de entrada y salida aplicadas.
- Se caracteriza la gestión de trabajos de mantenimiento sobre instalaciones eléctricas como un problema de selección de proyectos. Al aplicar sobre esta caracterización conceptos de procesos biológicos y físicos, sus leyes (evolución, función, organización y estructura) son aplicables y es posible aplicar técnicas de control similares, abriendo un nuevo espectro de herramientas que es posible utilizar para incorporar nuevas variables nunca consideradas en los estudios cuantitativos clásicos. Típicamente estas variables serán las variables externas y las internas de tipo cualitativo, como las preferencias del decisor, sobre las que es posible aplicar métodos cualitativos antes vedados por la carencia de datos o nuevas herramientas cuantitativas propias de otras disciplinas.
- Realza el papel del razonamiento humano en la toma de las decisiones y hace una propuesta de acercamiento a su representación sistemática mediante el uso de ontologías. Este estudio amplía la literatura existente sobre el uso de ontologías en nuevos campos de estudio y abre camino en su aplicación a procesos dinámicos. Utilizar el razonamiento basado en el Caso, apoyado sobre ontologías, en organizaciones de mantenimiento ayudaría en la mejora de la gestión. Contribuye a aumentar la memoria corporativa y a establecer similitudes entre casos de distintos ámbitos que evitarían o reducirían las consecuencias de determinados tipos de fallo. Permite, adicionalmente, detectar y elevar a representativas variables que, por su importancia en un caso determinado, pero con escasa o nula presencia en otros similares, un estudio estadístico despreciaría.
- Incorpora el concepto de control adaptativo, extendido en el sector de la ingeniería, a la investigación de las ciencias sociales. Se plantea un mecanismo de adaptación novedoso en el mundo de la economía que permite dirigir de forma eficaz la evolución de las variables deseadas a lo largo de un periodo de tiempo mediante el control de determinados parámetros en instantes de muestreo considerados. Al añadir un mecanismo de adaptación que realimente al sistema de control con el error de la salida en instantes discretos de tiempo, se elimina la necesidad de conocer el estado de todas las variables del sistema. Los valores medibles de entradas y salidas darán la información necesaria y suficiente para ejercer las acciones de control necesarias.

En el entorno de la aplicación práctica, las conclusiones de esta Tesis demuestran que es posible realizar un proceso sistemático de selección de proyectos, en el campo de la gestión de trabajos, incorporando las preferencias del decisor y considerando la influencia de las variables externas sin necesidad de enormes y complejos sistemas de simulación.

El enfoque propuesto se ha construido a través de una combinación de técnicas existentes en diferentes disciplinas. El método genérico desarrollado tiene un espíritu eminentemente práctico, orientado a ayudar a las organizaciones en la gestión de sus tareas de mantenimiento.

- Se han identificado un conjunto de variables externas con influencia sobre las tareas de mantenimiento utilizando el método de razonamiento basado en el Caso combinado con técnicas de análisis de datos desestructurados.
- Se ha comprobado que el planteamiento del problema en tres etapas simples secuenciales permite dar una solución "buena" al problema de la gestión de las tareas de mantenimiento durante un periodo de programación.
- Se ha verificado una aplicación del modelo en un caso real de control presupuestario con una variable de control y una salida, consiguiendo un ahorro significativo del 7%.

6.3. Limitaciones y futuras líneas de investigación.

Las principales limitaciones del estudio y desarrollos teóricos descritos en esta Tesis se derivan del propio tema central de la misma, del tipo de metodología de investigación utilizada y de la naturaleza teórica de los resultados obtenidos.

El modelado del conocimiento del campo de estudio exige la utilización de métodos de investigación cualitativos que incorporen la influencia de variables externas no medibles cuantitativamente. Esto conduce a que los resultados obtenidos, en ese aspecto, sean claramente específicos para el caso estudiado. Sin embargo, al analizar el problema concreto se ha considerado este aspecto y se ha incorporado en la selección de las técnicas descritas para su aplicabilidad en otras áreas de estudio, permitiendo generalizar todo el modelo conceptual.

En todo trabajo de investigación y, en particular, en el realizado en esta Tesis Doctoral, teniendo en cuenta la gran amplitud y aplicabilidad de los temas estudiados, existen multitud de líneas que no han sido (suficientemente) exploradas y, por tanto, dejan cuestiones abiertas para una futura investigación. En este sentido, reseñaremos brevemente algunas de las más importantes cuyo estudio consideraremos a corto y medio plazo.

1. En el campo del modelo de conocimiento:

- Profundizar en los conceptos de similitud de casos, determinando qué algoritmo de razonamiento aporta los resultados más útiles para el decisor es una línea de trabajo que es necesario acometer próximamente. Esta fase no se ha podido acometer debido al estado embrionario en el que se encuentran la base de conocimiento de casos.
- Desarrollar el modelo de búsqueda y extracción de datos procedentes de fuentes diversas también representa un reto interesante desde el punto de vista de tratamiento informático del tema.
- Investigar hasta qué punto podría aportar valor la conexión de nuestra ontología de dominio con otras ontologías existentes, llegando a identificar los beneficios esperables (recuperando conocimiento de temas alternativos) es una cuestión de reflexión muy atractiva para el futuro.
- Avanzar en la creación de un razonador sobre la ontología de Dominio que permite aprovechar la información de casos anteriores, estudiados con suficiente detalle, para intentar identificar las causas raíz de un problema aplicando reglas de semejanza. La pregunta que quedaría por resolver sería: ¿Cuál es la causa raíz del problema?

2. En el campo del modelo de decisión hay tres caminos principales:

- a) El modelo monovariable propuesto permite, por simple agregación, representar cualquier sistema multivariable. Una cuestión apetecible se deriva de extrapolar el mismo concepto de caja negra para el sistema multivariable. El problema sería determinar cuántos parámetros son necesarios para relacionar todas las entradas con las salidas manteniendo una representación fiable del comportamiento del sistema.
- b) Las tres etapas propuestas proporcionan una solución realizable. Como se vio en la aplicación práctica, simplemente con eso se puede conseguir un importante ahorro. Tratar de incorporar mecanismos que garanticen óptimos, máximos o mínimos de determinadas variables de salida o simplemente la mejor solución para cada decisor es otro interesante campo de investigación futura.
- c) En la aplicación práctica se detectó la presencia de trabajos en diferentes fechas sobre la misma instalación. El modelo propuesto detecta esa situación y la corrige. Parece evidente el ahorro por los desplazamientos. Y también parece evidente que puede haber ahorros por las sinergias entre trabajos. El análisis de las sinergias derivadas de aprovechar la misma visita a la instalación para hacer todos los trabajos necesarios, incluso siendo de distinta naturaleza, es otro tema de gran interés práctico para desarrollar en el futuro.

Bibliografía

[a]

- [ABS⁺09a] J Romero Agüero, RE Brown, J Spare, E Phillips, Le Xu, and Jia Wang. A reliability improvement roadmap based on a predictive model and extrapolation technique. In *Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE'09. IEEE/PES*, pages 1–8. IEEE, 2009.
- [ABS⁺09b] J Romero Agüero, RE Brown, J Spare, E Phillips, Le Xu, and Jia Wang. A reliability improvement roadmap based on a predictive model and extrapolation technique. In *Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE'09. IEEE/PES*, pages 1–8. IEEE, 2009.
- [ABT09a] Nassima Aissani, Bouziane Beldjilali, and Damien Trentesaux. Dynamic scheduling of maintenance tasks in the petroleum industry: A reinforcement approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22(7):1089–1103, 2009.
- [ABT09b] Nassima Aissani, Bouziane Beldjilali, and Damien Trentesaux. Dynamic scheduling of maintenance tasks in the petroleum industry: A reinforcement approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22(7):1089–1103, 2009.
- [ADB⁺99] Gregory D Abowd, Anind K Dey, Peter J Brown, Nigel Davies, Mark Smith, and Pete Steggle. Towards a better understanding of context and context-awareness. In *Handheld and ubiquitous computing*, pages 304–307. Springer, 1999.
- [ÅE71] Karl Johan Åström and Peter Eykhoff. System identification—a survey. *Automatica*, 7(2):123–162, 1971.
- [AGH98] Shoshana Anily, Celia A Glass, and Refael Hassin. The scheduling of maintenance service. *Discrete Applied Mathematics*, 82(1):27–42, 1998.

- [Agu] MA Aguilera. Determinacion de valores estandares, para la actividad de explotacion de la red en instalaciones de distribucion electrica. Master's thesis. Acceso: 15/8/2015.
- [Agu08] Buyung Agusdinata. Exploratory modeling and analysis: a promising method to deal with deep uncertainty. 2008.
- [Åhr08] Thomas Åhrén. Maintenance performance indicators (mpis) for railway infrastructure: identification and analysis for improvement. 2008.
- [ALdP95] D Alcaide López de Pablo. Problemas de planificación y secuenciación determinística: modelización y técnicas de resolución. *Curso deficiencia y tecnología. Universidad de la Laguna*, 1995.
- [Ale] Alejandro. Algoritmos de optimizacion basados en colonias de hormigas aplicados al problema de asignacion cuadratica y otros problemas relacionados. Master's thesis. Acceso: 15/8/2015.
- [ALW95] MR Allison, KG Lewis, and ML Winfield. An integrated approach to reliability assessment, maintenance and life cycle costs in the national grid company. 1995.
- [Alz93] Hassan J Alzubaidi. *Maintenance modelling of a major hospital complex*. PhD thesis, University of Salford, UK, 1993.
- [AM] M Andres Muñoz. Estrategias evolutivas aplicadas a los algoritmos de enjambres para el control de sistemas complejos. Master's thesis. Acceso: 15/8/2015.
- [AMA08] Dimitris Apostolou, Gregoris Mentzas, and Andreas Abecker. Managing knowledge at multiple organizational levels using faceted ontologies. *Journal of Computer Information Systems*, 49(2):32–49, 2008.
- [Ana13] Stanislav Anatolyev. Instrumental variables estimation and inference in the presence of many exogenous regressors. *The Econometrics Journal*, 16(1):27–72, 2013.
- [ANCP11a] Montse Aulinas, Juan Carlos Nieves, Ulises Cortés, and Manel Poch. Supporting decision making in urban wastewater systems using a knowledge-based approach. *Environmental Modelling & Software*, 26(5):562–572, 2011.
- [ANCP11b] Montse Aulinas, Juan Carlos Nieves, Ulises Cortés, and Manel Poch. Supporting decision making in urban wastewater systems using a knowledge-based approach. *Environmental Modelling & Software*, 26(5):562–572, 2011.

- [AP81] Pierre Aubenque and Vidal Peña. *El problema del ser en Aristóteles*. Taurus Madrid, 1981.
- [ARNOLRC13] Ignasi Abío Roig, Robert Nieuwenhuis, Albert Oliveras Llunell, and Enric Rodríguez Carbonell. Solving hard industrial combinatorial problems with sat. 2013.
- [AUBAGMdlÁJR] Joanna Alvarado-Uribe, Ari Yair Barrera-Animas, Miguel González-Mendoza, and Ma de los Ángeles Junco-Rey. Diseño de agentes para recuperar información para el enriquecimiento de ontologías dirigidas a epidemiología: el caso de la tuberculosis.
- [BAD07] MA Burhanuddin, AR Ahmad, and MI Desa. An application of decision making grid to improve maintenance strategies in small and medium industries. In *Industrial Electronics and Applications, 2007. ICIEA 2007. 2nd IEEE Conference on*, pages 455–460. IEEE, 2007.
- [Bak11a] Kenneth R Baker. Solving sequencing problems in spreadsheets. *International Journal of Planning and Scheduling*, 1(1-2):3–18, 2011.
- [Bak11b] Kenneth R Baker. Solving sequencing problems in spreadsheets. *International Journal of Planning and Scheduling*, 1(1-2):3–18, 2011.
- [Bar12a] I Barba. *Algoritmos de planificación basados en restricciones para la sustitución de componentes defectuosos*. PhD thesis, Universidad de Sevilla, 2012. Acceso: 15/8/2015.
- [Bar12b] I Barba. *Algoritmos de planificación basados en restricciones para la sustitución de componentes defectuosos*. PhD thesis, Universidad de Sevilla, 2012. Acceso: 15/8/2015.
- [BASV10] Lin Bao, Ahmad Al-Shishtawy, and Vladimir Vlassov. Policy based self-management in distributed environments. In *Self-Adaptive and Self-Organizing Systems Workshop (SASOW), 2010 Fourth IEEE International Conference on*, pages 256–260. IEEE, 2010.
- [BB00a] Maurizio Bevilacqua and Marcello Braglia. The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. *Reliability Engineering & System Safety*, 70(1):71–83, 2000.
- [BB00b] Maurizio Bevilacqua and Marcello Braglia. The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. *Reliability Engineering & System Safety*, 70(1):71–83, 2000.
- [BBH⁺02] Dennis Baker, Donald Bridges, Regina Hunter, Gregory Johnson, Joseph Krupa, James Murphy, and Ken Sorenson. Guidebook to

- decision-making methods. Retrieved from Department of Energy, USA: http://emiweb.inel.gov/Nissmg/Guidebook_2002.pdf, 2002.
- [BDKR09] JM Blackmore, Graeme Clyde Dandy, G Kuczera, and J Rahman. Making the most of modelling: A decision framework for the water industry. In *Proceedings of the 18th World IMACS/MODSIM Congress, Cairns, Australia*, pages 3775–3781, 2009.
- [BDTD97] Antoine Bechara, Hanna Damasio, Daniel Tranel, and Antonio R Damasio. Deciding advantageously before knowing the advantageous strategy. *Science*, 275(5304):1293–1295, 1997.
- [BDVB09] Irene Barba, Carmelo Del Valle, and Diana Borrego. A constraint-based job-shop scheduling model for software development planning. *Actas de los Talleres de las Jornadas de Ingeniería del Software y Bases de Datos*, 3(1), 2009.
- [BGC⁺96] Richard Eric Brown, Shalini Gupta, Richard D Christie, Subrahmanyam S Venkata, and R Fletcher. Distribution system reliability assessment using hierarchical markov modeling. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 11(4):1929–1934, 1996.
- [BGH⁺98a] G Bretthauer, T Gamaleja, E Handschin, U Neumann, and W Koffmann. Integrated maintenance scheduling system for electrical energy systems. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 13(2):655–660, 1998.
- [BGH⁺98b] G Bretthauer, T Gamaleja, E Handschin, U Neumann, and W Koffmann. Integrated maintenance scheduling system for electrical energy systems. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 13(2):655–660, 1998.
- [BHZ13] MohammadHossein Bateni, MohammadTaghi Hajiaghayi, and Mor-teza Zadimoghaddam. Submodular secretary problem and extensions. *ACM Transactions on Algorithms (TALG)*, 9(4):32, 2013.
- [BK13] Kerem Bülbül and Philip Kaminsky. A linear programming-based method for job shop scheduling. *Journal of Scheduling*, 16(2):161–183, 2013.
- [BL12] Thomas J. Brennan and Andrew W. Lo. An evolutionary model of bounded rationality and intelligence. *PLoS ONE*, 7(11):e50310, 11 2012.
- [BMZ00] Emanuele Borgonovo, Marzio Marseguerra, and Enrico Zio. A monte carlo methodological approach to plant availability modeling with

- maintenance, aging and obsolescence. *Reliability Engineering & System Safety*, 67(1):61–73, 2000.
- [BN08] Rajiv D Banker and Ram Natarajan. Evaluating contextual variables affecting productivity using data envelopment analysis. *Operations research*, 56(1):48–58, 2008.
- [BPRK11] Antonio Bucchiarone, Marco Pistore, Heorhi Raik, and Raman Kazhamiak. Adaptation of service-based business processes by context-aware replanning. In *Service-Oriented Computing and Applications (SOCA), 2011 IEEE International Conference on*, pages 1–8. IEEE, 2011.
- [BYAM10a] Ali Berrichi, Farouk Yalaoui, Lionel Amodeo, and M Mezghiche. Bi-objective ant colony optimization approach to optimize production and maintenance scheduling. *Computers & Operations Research*, 37(9):1584–1596, 2010.
- [BYAM10b] Ali Berrichi, Farouk Yalaoui, Lionel Amodeo, and M Mezghiche. Bi-objective ant colony optimization approach to optimize production and maintenance scheduling. *Computers & Operations Research*, 37(9):1584–1596, 2010.
- [CA05] Rommel Fernando Cela Andagoya. *Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) del autotransformador de Pomasqui 230/138/13.8 kV*. PhD thesis, QUITO/EPN/2005, 2005.
- [CA09] Alejandro Centeno and Anibal Aguilera. Problemas de optimización en ingeniería y el algoritmo de enjambre de partículas. 2009.
- [Cam09] Fatih Camci. System maintenance scheduling with prognostics information using genetic algorithm. *Reliability, IEEE Transactions on*, 58(3):539–552, 2009.
- [Cas96] Ángel Fernández Castro. *Análisis coste beneficio: aplicación a la selección de inversiones*. Tórculo Ediciones, 1996.
- [CAS08] Sofie Coene, Arent Arnout, and Frits Spieksma. The periodic vehicle routing problem: a case study. *Available at SSRN 1368749*, 2008.
- [CCC09a] Sai Ho Chung, Felix TS Chan, and Hing Kai Chan. A modified genetic algorithm approach for scheduling of perfect maintenance in distributed production scheduling. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22(7):1005–1014, 2009.
- [CCC09b] Sai Ho Chung, Felix TS Chan, and Hing Kai Chan. A modified genetic algorithm approach for scheduling of perfect maintenance in distri-

- buted production scheduling. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22(7):1005–1014, 2009.
- [CCGM09] PF Correia, J Contreras, RC Garcia, and JI Munoz. Contracts for recovery of investments in transmission assets. *IET generation, transmission & distribution*, 3(11):971–979, 2009.
- [CFLGP07a] Oscar Corcho, Mariano Fernandez-Lopez, and Asuncion Gomez-Perez. Ontological engineering: What are ontologies and how can we build them? 2007.
- [CFLGP07b] Oscar Corcho, Mariano Fernandez-Lopez, and Asuncion Gomez-Perez. Ontological engineering: What are ontologies and how can we build them? 2007.
- [CG03] José Manuel Casado González. Decálogo etiológico de las esquizofrenias empresariales. *Harvard Deusto Business Review*, (119):56–68, 2003.
- [Che04] Thomas J Chermack. Improving decision-making with scenario planning. *Futures*, 36(3):295–309, 2004.
- [CJPP11] Sherrie D Cannoy, Timothy D Jacks, Prashant D Palvia, and Praveen D Pinjani. Contextual constraints in media choice: Beyond information richness. 2011.
- [CKK13] IA Chaudry, Abdul Munem Khan, and Abid Ali Khan. A genetic algorithm for flexible job shop scheduling. In *Proceedings of the world congress on engineering*, volume 1, pages 703–708, 2013.
- [CL03a] Jim Q Chen and Sang M Lee. An exploratory cognitive dss for strategic decision making. *Decision support systems*, 36(2):147–160, 2003.
- [CL03b] Jim Q Chen and Sang M Lee. An exploratory cognitive dss for strategic decision making. *Decision support systems*, 36(2):147–160, 2003.
- [Cla88] David W Clarke. Application of generalized predictive control to industrial processes. *Control Systems Magazine, IEEE*, 8(2):49–55, 1988.
- [CLHI09a] Sai Ho Chung, Henry CW Lau, George TS Ho, and WH Ip. Optimization of system reliability in multi-factory production networks by maintenance approach. *Expert Systems with Applications*, 36(6):10188–10196, 2009.
- [CLHI09b] Sai Ho Chung, Henry CW Lau, George TS Ho, and WH Ip. Optimization of system reliability in multi-factory production net-

- works by maintenance approach. *Expert Systems with Applications*, 36(6):10188–10196, 2009.
- [CLT05a] Waiman Cheung, Lawrence C Leung, and Philip CF Tam. An intelligent decision support system for service network planning. *Decision Support Systems*, 39(3):415–428, 2005.
- [CLT05b] Waiman Cheung, Lawrence C Leung, and Philip CF Tam. An intelligent decision support system for service network planning. *Decision Support Systems*, 39(3):415–428, 2005.
- [CLW08] Zhiyu Chen, Shufen Liu, and Xiao Wang. Application of context-aware computing in manufacturing execution system. In *Automation and Logistics, 2008. ICAL 2008. IEEE International Conference on*, pages 1969–1973. IEEE, 2008.
- [CMSSF86] WR Cluett, JM Martin-Sanchez, SL Shah, and DG Fisher. Stable discrete-time adaptive control in the presence of unmodeled dynamics. In *American Control Conference, 1986*, pages 713–720. IEEE, 1986.
- [CMT87] David W Clarke, C Mohtadi, and PS Tuffs. Generalized predictive control—part i. the basic algorithm. *Automatica*, 23(2):137–148, 1987.
- [Coo71] Stephen A Cook. The complexity of theorem-proving procedures. In *Proceedings of the third annual ACM symposium on Theory of computing*, pages 151–158. ACM, 1971.
- [Cow01] Nelson Cowan. The Magical Number 4 in Short-Term Memory: A Reconsideration of Mental Storage Capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(1):87–114, 2001.
- [CP08a] Javier A Carrasco Pena. *Supplier selection as a change process: a grounded theory approach*. PhD thesis, Universidade da Coruña, 2008.
- [CP08b] Javier A Carrasco Pena. *Supplier selection as a change process: a grounded theory approach*. 2008.
- [CPS09] José Manuel Cordero, Francisco Pedraja, and Daniel Santín. Alternative approaches to include exogenous variables in dea measures: A comparison using monte carlo. *Computers & Operations Research*, 36(10):2699–2706, 2009.
- [CS14] Muffy Calder and Michele Sevegnani. Do i need to fix a failed component now, or can i wait until tomorrow? In *Dependable Computing Conference (EDCC), 2014 Tenth European*, pages 70–81. IEEE, 2014.

-
- [CSJ] Marco Antonio Cruz Chávez, Juan Frausto Solís, and David Juárez. Un algoritmo de satisfactibilidad para el problema de job shop scheduling.
- [CWC11a] C Cheng, M Wang, and J Chen. A modified age reduction pm model in a finite time span. In *Quality and Reliability (ICQR), 2011 IEEE International Conference on*, pages 145–149. IEEE, 2011.
- [CWC11b] C Cheng, M Wang, and J Chen. A modified age reduction pm model in a finite time span. In *Quality and Reliability (ICQR), 2011 IEEE International Conference on*, pages 145–149. IEEE, 2011.
- [CYH11] LP Chen, ZS Ye, and Boray Huang. Condition-based maintenance for systems under dependent competing failures. In *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2011 IEEE International Conference on*, pages 1586–1590. IEEE, 2011.
- [DAGCRGSRG07] Belén Díaz-Agudo, Pedro A González-Calero, Juan A Recio-García, and Antonio A Sánchez-Ruiz-Granados. Building cbr systems with jcolibri. *Science of Computer Programming*, 69(1):68–75, 2007.
- [Dav01] Donald Davidson. *Subjective, intersubjective, objective*. Clarendon Press Oxford, 2001.
- [DBC06] Barbara DiCicco-Bloom and Benjamin F Crabtree. The qualitative research interview. *Medical education*, 40(4):314–321, 2006.
- [dE09] Red Electrica de España. El suministro de la electricidad. un equilibrio entre generacion y consumo. Technical report, Red Electrica de España, 2009.
- [dHMC04] Santiago López de Haro, Pedro Sánchez Martín, and Javier Conde Collado. Secuenciación de tareas mediante metaheurísticos. In *VIII Congreso de Ingeniería de Organización*, pages 1021–1031, 2004.
- [DK08] TD Dimitrakos and EG Kyriakidis. A semi-markov decision algorithm for the maintenance of a production system with buffer capacity and continuous repair times. *International Journal of Production Economics*, 111(2):752–762, 2008.
- [DKB07a] Inge AT De Kort and Martijn J Booiij. Decision making under uncertainty in a decision support system for the red river. *Environmental modelling & software*, 22(2):128–136, 2007.
- [DKB07b] Inge AT De Kort and Martijn J Booiij. Decision making under uncertainty in a decision support system for the red river. *Environmental modelling & software*, 22(2):128–136, 2007.

- [dLF04] Daniel Serra de La Figuera. *Métodos cuantitativos para la toma de decisiones*. Gestión 2000, 2004.
- [DMPP04] Rafaela Dios, JM Martínez-Paz, and Federico Martínez-Carrasco Pleite. Variables de entorno en el análisis de eficiencia. un método de tres etapas con variables categóricas. Technical report, Centro de Estudios Andaluces, 2004.
- [DR59] George B Dantzig and John H Ramser. The truck dispatching problem. *Management science*, 6(1):80–91, 1959.
- [DRZ⁺10] Alfredo D’Elia, Luca Roffia, Guido Zamagni, Fabio Vergari, Alessandra Toninelli, and Paolo Bellavista. Smart applications for the maintenance of large buildings: How to achieve ontology-based interoperability at the information level. In *Computers and Communications (ISCC), 2010 IEEE Symposium on*, pages 1–6. IEEE, 2010.
- [DT01] Thomas Dudey and Peter M Todd. Making good decisions with minimal information: Simultaneous and sequential choice. *Journal of Bioeconomics*, 3(2-3):195–215, 2001.
- [Dub98] A Dubi. Analytic approach & monte carlo methods for realistic systems analysis. *Mathematics and computers in simulation*, 47(2):243–269, 1998.
- [DWM01] Aseem Das, Wei Wu, and Deborah L McGuinness. Industrial strength ontology management. In *The Emerging Semantic Web*, 2001.
- [EFJ⁺10] Christos Emmanouilidis, Luca Fumagalli, Erkki Jantunen, Petros Pistofidis, Marco Macchi, and Marco Garetti. Condition monitoring based on incremental learning and domain ontology for condition-based maintenance. In *11th International Conference on Advances in Production Management Systems, APMS*, 2010.
- [EGS03] Peter Ernst, Karl-Heinz Glatting, and Sándor Suhai. A task framework for the web interface w2h. *Bioinformatics*, 19(2):278–282, 2003.
- [EKVa] Domokos Esztergár-Kiss and Dénes Válóczy. Method for the organization of daily activity chains.
- [EKVb] Domokos Esztergár-Kiss and Dénes Válóczy. Method for the organization of daily activity chains.
- [ES10] Fernando F Espinosa and Gonzalo E Salinas. Evaluación de la madurez de la función mantenimiento para implementar innovaciones en su gestión. *Información tecnológica*, 21(3):3–12, 2010.

- [Esp97] España. Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del sector eléctrico. BOE núm. 285, de 28 de noviembre de 1997, páginas 35097 a 35126, 1997.
- [Esp00] España. Real decreto 1955/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica. BOE núm. 310, de 27 de diciembre de 2000, páginas 45988 a 46040, 2000.
- [Esp08] España. Real decreto 222/2008, de 15 de febrero, por el que se establece el régimen retributivo de la actividad de distribución de energía eléctrica. BOE núm. 67, de 18 de marzo de 2008, páginas 16067 a 16089, 2008.
- [Esp13] España. Real decreto 1047/2013, de 27 de diciembre, por el que se establece la metodología para el cálculo de la retribución de la actividad de transporte de energía eléctrica. BOE núm. 312, de 30 de diciembre de 2013, páginas 106563 a 106593, 2013. Deroga al RD2819/1998.
- [FB06] Baltazár Frankovič and Ivana Budinská. The role of ontology in building of knowledge systems for industrial applications. In *4th Slovakian-Hungarian Joint Symposium on Applied Machine Intelligence, Herlany, Slovakia*, 2006.
- [FCDT02] Ángel S Fernández Castro and Félix R Doldán Tie. Aplicación del índice de productividad de malmquist a la evaluación de productos. *Revista Europea de Dirección y Economía de la Empresa*, 11(3):173–180, 2002.
- [FDS07] Vitor Hugo Ferreira and Alexandre P Alves Da Silva. Toward estimating autonomous neural network-based electric load forecasters. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 22(4):1554–1562, 2007.
- [FHCZ11a] Hongdong Fan, Changhua Hu, Maoyin Chen, and Donghua Zhou. Cooperative predictive maintenance of repairable systems with dependent failure modes and resource constraint. *Reliability, IEEE Transactions on*, 60(1):144–157, 2011.
- [FHCZ11b] Hongdong Fan, Changhua Hu, Maoyin Chen, and Donghua Zhou. Cooperative predictive maintenance of repairable systems with dependent failure modes and resource constraint. *Reliability, IEEE Transactions on*, 60(1):144–157, 2011.

- [FHM09] Hasan Fauzi, Mostaq M Hussain, and Lois Mahoney. Management control systems and contextual variables in the hospitality industry. *ssrn*, 2009.
- [FHT93] Jerry Fjermestad, Starr Roxanne Hiltz, and Murray Turoff. An integrated framework for the study of group decision support systems. In *System Sciences, 1993, Proceeding of the Twenty-Sixth Hawaii International Conference on*, volume 4, pages 179–188. IEEE, 1993.
- [FM60] JH Fox and LG Marnie. Martin gardner’s column mathematical games. *Sci. Am*, 202:150–153, 1960.
- [For58] Jay W Forrester. Industrial dynamics: a major breakthrough for decision makers. *Harvard business review*, 36(4):37–66, 1958.
- [For90] Ernest H Forman. Multi criteria decision making and the analytic hierarchy process. In *Readings in multiple criteria decision aid*, pages 295–318. Springer, 1990.
- [Fra11] A Fraile. Ntp924: Causas de accidentes: clasificación y codificación. *Madrid, Spain: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo*, 2011.
- [FRCD12] Ana Funes, Elizabeth Reinoso, Marcelo Castro, and Aristides Dasso. Creación y evaluación de modelos lsp en un contexto mda. In *XIV Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*, 2012.
- [Fre83] PR Freeman. The secretary problem and its extensions: A review. *International Statistical Review/Revue Internationale de Statistique*, pages 189–206, 1983.
- [FS91a] William H Farr and Oliver D Smith. Statistical modeling and estimation of reliability functions for software (smerfs) library access guide. *Naval Surface Weapons Center, Tech. Rep. NAVSWC TR-84-371, rev, 2*, 1991.
- [FS91b] William H Farr and Oliver D Smith. Statistical modeling and estimation of reliability functions for software (smerfs) library access guide. *Naval Surface Weapons Center, Tech. Rep. NAVSWC TR-84-371, rev, 2*, 1991.
- [Fu11] Yin Fu. Analysis of influencing factors to the maintenance quality of the aviation equipment based on interpretative structural modeling. In *Grey Systems and Intelligent Services (GSIS), 2011 IEEE International Conference on*, pages 748–752. IEEE, 2011.

- [GDCVG13] María del Pilar Gálvez Díaz, NR Cáceres, EC Velázquez, and AN Guzmán. Modelo para aplicaciones sensibles al contexto: validación y evaluación. In *XV Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*, 2013.
- [GDWY08a] Yu-jiong Gu, Xiao-feng Dong, Jian-jun Wu, and Kun Yang. Study on multi-agent based maintenance decision support system used for power plant equipment. In *Industrial Engineering and Engineering Management, 2008. IEEM 2008. IEEE International Conference on*, pages 2167–2171. IEEE, 2008.
- [GDWY08b] Yu-jiong Gu, Xiao-feng Dong, Jian-jun Wu, and Kun Yang. Study on multi-agent based maintenance decision support system used for power plant equipment. In *Industrial Engineering and Engineering Management, 2008. IEEM 2008. IEEE International Conference on*, pages 2167–2171. IEEE, 2008.
- [GDY09] Yu-jiong Gu, Xiao-feng Dong, and Kun Yang. Study on maintenance method intelligent decision support system used for power plant equipment. In *Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific*, pages 1–4. IEEE, 2009.
- [GJ90] Michael R. Garey and David S. Johnson. *Computers and Intractability; A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W. H. Freeman & Co., New York, NY, USA, 1990.
- [GJ99] José Antonio Laínez Gadea and José Ignacio Jame Jame. El entorno como variable discriminante en la diferenciación internacional de sistemas contables. *revista de contabilidad*, 2(3):73–101, 1999.
- [GMS⁺11] Tomás Gómez, Carlos Mateo, Álvaro Sánchez, Javier Reneses, and Michel Rivier. La retribución de la distribución de electricidad en España y el modelo de red de referencia. *Estudios de economía aplicada*, 29(2):14–24, 2011.
- [GMV12a] Fotouhi Ghazvini, Hugo Morais, and Zita Vale. Coordination between mid-term maintenance outage decisions and short-term security-constrained scheduling in smart distribution systems. *Applied Energy*, 96:281–291, 2012.
- [GMV12b] Fotouhi Ghazvini, Hugo Morais, and Zita Vale. Coordination between mid-term maintenance outage decisions and short-term security-constrained scheduling in smart distribution systems. *Applied Energy*, 96:281–291, 2012.

- [GPB99] Asunción Gómez-Pérez and Richard Benjamins. Overview of knowledge sharing and reuse components: Ontologies and problem-solving methods. IJCAI and the Scandinavian AI Societies. CEUR Workshop Proceedings, 1999.
- [GPFW99a] Jun Gu, Paul W Purdom, John Franco, and Benjamin W Wah. *Algorithms for the satisfiability (sat) problem*. Springer, 1999.
- [GPFW99b] Jun Gu, Paul W Purdom, John Franco, and Benjamin W Wah. *Algorithms for the satisfiability (sat) problem*. Springer, 1999.
- [GSMGS09a] Jose P Garcia-Sabater, J Maheut, and JJ Garcia-Sabater. A decision support system for aggregate production planning based on milp: A case study from the automotive industry. In *Computers & Industrial Engineering, 2009. CIE 2009. International Conference on*, pages 366–371. IEEE, 2009.
- [GSMGS09b] Jose P Garcia-Sabater, J Maheut, and JJ Garcia-Sabater. A decision support system for aggregate production planning based on milp: A case study from the automotive industry. In *Computers & Industrial Engineering, 2009. CIE 2009. International Conference on*, pages 366–371. IEEE, 2009.
- [Gup92] Narendra K Gupta. Uncertainty representation in practical decision support systems for the field service of large systems. In *Artificial Intelligence for Applications, 1992., Proceedings of the Eighth Conference on*, pages 44–50. IEEE, 1992.
- [Guz07] Jordi Guzman. Información, señal, comunidad y contexto: su importancia al tratar con sistemas adaptativos complejos. *Intangible Capital*, (1):33–60, 2007.
- [GvdKS06a] Alexander Grigoriev, Joris van de Klundert, and Frits CR Spieksma. Modeling and solving the periodic maintenance problem. *European Journal of Operational Research*, 172(3):783–797, 2006.
- [GvdKS06b] Alexander Grigoriev, Joris van de Klundert, and Frits CR Spieksma. Modeling and solving the periodic maintenance problem. *European Journal of Operational Research*, 172(3):783–797, 2006.
- [GW12] Henson Graves and Matthew West. Ontology in engineering systems. *INSIGHT*, 15(2):44–46, 2012.
- [HC03] Christopher K Hess and Roy H Campbell. A context-aware data management system for ubiquitous computing applications. In *Dis-*

-
- tributed Computing Systems, 2003. Proceedings. 23rd International Conference on*, pages 294–301. IEEE, 2003.
- [HD13] Max Henrion and Marek J Druzdzel. Qualitative propagation and scenario-based explanation of probabilistic reasoning. *arXiv preprint arXiv:1304.1082*, 2013.
- [Hei82] Charles R Heising. Quantitative relationship between scheduled electrical preventive maintenance and failure rate of electrical equipment. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, (3):268–272, 1982.
- [HIR02a] Karen Henricksen, Jadwiga Indulska, and Andry Rakotonirainy. Modeling context information in pervasive computing systems. In *Pervasive Computing*, pages 167–180. Springer, 2002.
- [HIR02b] Karen Henricksen, Jadwiga Indulska, and Andry Rakotonirainy. Modeling context information in pervasive computing systems. In *Pervasive Computing*, pages 167–180. Springer, 2002.
- [HJ01] Bonnie S Hauge and Donald C Johnston. Reliability centered maintenance and risk assessment. In *Reliability and Maintainability Symposium, 2001. Proceedings. Annual*, pages 36–40. IEEE, 2001.
- [HL09a] Ramón Hervás Lucas. *Modelado de contexto para la visualización de información en ambientes inteligentes*. PhD thesis, Universidad de Castilla La Mancha, 2009.
- [HL09b] Ramón Hervás Lucas. *Modelado de contexto para la visualización de información en ambientes inteligentes*. PhD thesis, Universidad de Castilla-La Mancha, 2009.
- [HMMB07] Patrik Hilber, Vladimiro Miranda, Manuel A Matos, and Lina Bertling. Multiobjective optimization applied to maintenance policy for electrical networks. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 22(4):1675–1682, 2007.
- [HN⁺12a] Andrew J Henry, Joel Nachlas, et al. An equivalent age model for condition-based maintenance. In *Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2012 Proceedings-Annual*, pages 1–6. IEEE, 2012.
- [HN12b] Andrew J Henry and Joel A Nachlas. An equivalent age model for condition-based maintenance. In *Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2012 Proceedings-Annual*, pages 1–6. IEEE, 2012.
- [HN12c] Andrew J Henry and Joel A Nachlas. An equivalent age model for condition-based maintenance. In *Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2012 Proceedings-Annual*, pages 1–6. IEEE, 2012.

-
- [Ili11] Marija D Ilić. Dynamic monitoring and decision systems for enabling sustainable energy services. *Proceedings of the IEEE*, 99(1):58–79, 2011.
- [Iwa88a] Yumi Iwasaki. *Model based reasoning of device behavior with causal ordering*. PhD thesis, Carnegie Mellon University, 1988.
- [Iwa88b] Yumi Iwasaki. *Model based reasoning of device behavior with causal ordering*. PhD thesis, Carnegie Mellon University, 1988.
- [Jam11] Steven Michael James. *Triangulation and the problem of objectivity*. PhD thesis, The Ohio State University, 2011.
- [Jia10] Changbing Jiang. A reliable solver of euclidean traveling salesman problems with microsoft excel add-in tools for small-size systems. *Journal of Software*, 5(7):761–768, 2010.
- [JM02a] Hector A Jensen and Sergio Maturana. A possibilistic decision support system for imprecise mathematical programming problems. *International Journal of Production Economics*, 77(2):145–158, 2002.
- [JM02b] Hector A Jensen and Sergio Maturana. A possibilistic decision support system for imprecise mathematical programming problems. *International Journal of Production Economics*, 77(2):145–158, 2002.
- [Jos06] Paul L Joskow. Introduction to electricity sector liberalization: lessons learned from cross-country studies. *Electricity market reform: an international perspective*, 1:1–32, 2006.
- [JZ⁺07] Suprasith Jarupathirun, Fatemeh Zahedi, et al. Dialectic decision support systems: System design and empirical evaluation. *Decision Support Systems*, 43(4):1553–1570, 2007.
- [Kaf01] Hédi Kaffel. *La maintenance distribuée: concept, évaluation et mise en œuvre*. PhD thesis, Université Laval Quebec, 2001.
- [Kar72] Richard M Karp. *Reducibility among combinatorial problems*. Springer, 1972.
- [KBS10] Amir H Khataie, Akif A Bulgak, and Juan J Segovia. Advanced decision support tool by integrating activity-based costing and management to system dynamics. In *Technology Management for Global Economic Growth (PICMET), 2010 Proceedings of PICMET'10:*, pages 1–4. IEEE, 2010.
- [KCMZ12] Mohamed Hedi Karray, Brigitte Chebel-Morello, and Noureddine Zerhouni. A formal ontology for industrial maintenance. *Applied Ontology Journal*, 7:269–310, 2012.

- [Ker01] William H Kersting. Radial distribution test feeders. In *Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE*, volume 2, pages 908–912. IEEE, 2001.
- [KFCP03] B Kamsu-Foguem, V Chapurlat, and F Prunet. Modélisation et analyse formelle des systèmes complexes avec les graphes conceptuels: Application à la modélisation d’entreprise. In *Conférence Canadienne en Génie Industriel*, pages P–nd, 2003.
- [KG05] Rudolf Kruse and Jörg Gebhardt. Probabilistic graphical models in complex industrial applications. In *Hybrid Intelligent Systems, 2005. HIS’05. Fifth International Conference on*, pages 1–pp. IEEE, 2005.
- [Kha12] Nadjette Dendani-Hadibyand Mohamed Tarek Khadir. A case based reasoning system based on domain ontology for fault diagnosis of steam turbines. 2012.
- [Kit88] John F Kitchin. Practical markov modeling for reliability analysis. In *Reliability and Maintainability Symposium, 1988. Proceedings., Annual*, pages 290–296. IEEE, 1988.
- [Kit95] Jenny Kitzing. Qualitative research. introducing focus groups. *BMJ: British medical journal*, 311(7000):299, 1995.
- [KK01] Bokang Kim and Sooyoung Kim. Extended model for a hybrid production planning approach. *International Journal of Production Economics*, 73(2):165–173, 2001.
- [KKMG90] Dennis S Kira, Martin I Kusy, David H Murray, and Barbara J Goranson. A specific decision support system (sdss) to develop an optimal project portfolio mix under uncertainty. *Engineering Management, IEEE Transactions on*, 37(3):213–221, 1990.
- [KM99] Yoshinobu Kitamura and Riichiro Mizoguchi. An ontological analysis of fault process and category of faults. In *Proceedings of tenth international workshop on principles of diagnosis (DX-99)*, pages 118–128, 1999.
- [Kne96a] Jezdimir Knezevic. *Mantenibilidad*. Isdefe, 1996.
- [Kne96b] Jezdimir Knezevic. *Mantenimiento*. Isdefe, 1996.
- [KNRL13a] Joseph R Kasprzyk, Shanthi Nataraj, Patrick M Reed, and Robert J Lempert. Many objective robust decision making for complex environmental systems undergoing change. *Environmental Modelling & Software*, 42:55–71, 2013.

- [KNRL13b] Joseph R Kasprzyk, Shanthi Nataraj, Patrick M Reed, and Robert J Lempert. Many objective robust decision making for complex environmental systems undergoing change. *Environmental Modelling & Software*, 42:55–71, 2013.
- [Kon03] Oleksandr Kononenko. Ontology support for industrial web services. In *Workshop on Ontologies in Agent Systems*, page 75, 2003.
- [KP10] Harshit Kumar and Pil Seong Park. Know-ont: a knowledge ontology for an enterprise in an industrial domain. *International Journal of Database Theory and Application*, 3(1):23–32, 2010.
- [KS07a] Robb Klashner and Sameh Sabet. A dss design model for complex problems: Lessons from mission critical infrastructure. *Decision Support Systems*, 43(3):990–1013, 2007.
- [KS07b] Robb Klashner and Sameh Sabet. A dss design model for complex problems: Lessons from mission critical infrastructure. *Decision Support Systems*, 43(3):990–1013, 2007.
- [KS07c] Robb Klashner and Sameh Sabet. A dss design model for complex problems: Lessons from mission critical infrastructure. *Decision Support Systems*, 43(3):990–1013, 2007.
- [LA04] Sang M Lee and Arben A Asllani. Job scheduling with dual criteria and sequence-dependent setups: mathematical versus genetic programming. *Omega*, 32(2):145–153, 2004.
- [Lay76a] John Marius Layton. *Multivariable control theory*, volume 1. P. Peregrinus, 1976.
- [Lay76b] John Marius Layton. *Multivariable control theory*, volume 1. P. Peregrinus, 1976.
- [LB06a] J Lima and Benjamín Barán. Optimización de enjambre de partículas aplicada al problema del cajero viajante bi-objetivo. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial, Asociación Española para la Inteligencia Artificial Valencia España*, pages 67–76, 2006.
- [LB06b] J Lima and Benjamín Barán. Optimización de enjambre de partículas aplicada al problema del cajero viajante bi-objetivo. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial, Asociación Española para la Inteligencia Artificial Valencia España*, pages 67–76, 2006.
- [LF12] Anatoly Lisnianski and Ilia Frenkel. *Recent advances in system reliability*. Springer, 2012.

- [LG06] Juhnyoung Lee and Richard Goodwin. Ontology management for large-scale enterprise systems. *Electronic Commerce Research and Applications*, 5(1):2–15, 2006.
- [LGHT07] Martin Lukasiewicz, Michael Glaß, Christian Haubelt, and Jürgen Teich. Sat-decoding in evolutionary algorithms for discrete constrained optimization problems. In *Evolutionary Computation, 2007. CEC 2007. IEEE Congress on*, pages 935–942. IEEE, 2007.
- [LGPSS99a] Mariano Fernández López, Asunción Gómez-Pérez, Juan Pazos Sierra, and Alejandro Pazos Sierra. Building a chemical ontology using methontology and the ontology design environment. *IEEE intelligent Systems*, (1):37–46, 1999.
- [LGPSS99b] Mariano Fernández López, Asunción Gómez-Pérez, Juan Pazos Sierra, and Alejandro Pazos Sierra. Building a chemical ontology using methontology and the ontology design environment. *IEEE intelligent Systems*, 14(1):37–46, 1999.
- [LGW05] M Lee, T Gregory, and Matthew Welsh. Decision-making on the full information secretary problem. In *Annual Meeting of the Cognitive Science Society (26th: 2004: Chicago, Ill.)*, 2005.
- [LH04] Chinho Lin and Ping-Jung Hsieh. A fuzzy decision support system for strategic portfolio management. *Decision Support Systems*, 38(3):383–398, 2004.
- [LH10] Yu Liu and Hong-Zhong Huang. Optimal selective maintenance strategy for multi-state systems under imperfect maintenance. *Reliability, IEEE Transactions on*, 59(2):356–367, 2010.
- [LMAS⁺09] Carlos Lamsfus, David Martín, Aurkene Alzua-Sorzabal, Alejandro Cadenas, Carlos Ruiz, Raúl García-Castro, and María Poveda. Servicios turísticos en función del contexto basados en semántica. 2009.
- [Loa03] Brian J Loasby. Tiempo, conocimiento y dinámicas evolutivas: por qué las conexiones tienen importancia. *Análisis Económico*, 17(38), 2003.
- [LS04] Eva Teresa López Sanjuán. *Estudio de la fiabilidad de sistemas con reparaciones pospuestas*. PhD thesis, 2004.
- [LT93] Jean-Jacques Laffont and Jean Tirole. *A theory of incentives in procurement and regulation*. MIT press, 1993.
- [LWLJ07] Jinshu Li, Heyong Wang, Jing Liu, and Licheng Jiao. Solving sat problem with a multiagent evolutionary algorithm. In *Evolutionary*

-
- Computation, 2007. CEC 2007. IEEE Congress on*, pages 1416–1422. IEEE, 2007.
- [LXYZ07a] Chen Li, Chen Xuhua, Bai Yongsheng, and Cheng Zhonghua. Age replacement model based condition information. In *Electronic Measurement and Instruments, 2007. ICEMI'07. 8th International Conference on*, pages 2–468. IEEE, 2007.
- [LXYZ07b] Chen Li, Chen Xuhua, Bai Yongsheng, and Cheng Zhonghua. Age replacement model based condition information. In *Electronic Measurement and Instruments, 2007. ICEMI'07. 8th International Conference on*, pages 2–468. IEEE, 2007.
- [M09] Ziouziou M. Desarrollo de una ontología y de un sistema de recuperación de la información para el sector del mueble y afines. online, 2009. Acceso: 15/8/2015.
- [Mai] G Mailing. Algoritmos heurísticos y el problema de job shop scheduling. online. Acceso: 15/8/2015.
- [Mat] HL Mata. Uso del solver en la asignación de recursos. online. Acceso: 15/8/2015.
- [MB00] Riichiro Mizoguchi and Jacqueline Bourdeau. Using ontological engineering to overcome common ai-ed problems. *Journal of Artificial Intelligence and Education*, 11:107–121, 2000.
- [MC93] Xavier Mendoza and Carles Castells. El control del grupo de las empresas públicas de barcelona. 1993.
- [MCDDGD02] Edelmiro Míguez, José Cidrás, Eloy Díaz-Dorado, and José Luis García-Dornelas. An improved branch-exchange algorithm for large-scale distribution network planning. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 17(4):931–936, 2002.
- [MCMP05] Luis Andrés Marentes Cubillos, Andrés L Medaglia, and Fernando Palacios. Aproximación con algoritmos evolutivos para el problema de selección de proyectos con restricciones lineales y variables binarias bajo ambientes de incertidumbre. 2005.
- [MDÁRGEGHM12] José Eduardo Márquez-Delgado, Ricardo Lorenzo Ávila-Rondón, Miguel Ángel Gómez-Elvira-González, and Carlos Rafael Herrera-Márquez. Algoritmo genético aplicado a la programación en talleres de maquinado. *Ingeniería Mecánica*, 15(3):201–212, 2012.
- [Men73] Jerry M Mendel. *Discrete techniques of parameter estimation*. Taylor & Francis, Incorporated, 1973.

- [Mer98] Jack Meredith. Building operations management theory through case and field research. *Journal of operations management*, 16(4):441–454, 1998.
- [MF13] Zbigniew Michalewicz and David B Fogel. *How to solve it: modern heuristics*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [MG] MAI José Luis Cantú Mata and Miguel Ángel Palomo González. Modelo propuesto para la selección del servicio outsourcing y variables críticas para la decisión: Investigación preliminar.
- [MHF] Eni Mustafaraj, Martin Hoof, and Bernd Freisleben. Learning knowledge roles for populating lightweight application ontologies.
- [Mil56] George A Miller. The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychological review*, 63(2):81, 1956.
- [MJF07] Yinglong Ma, Beihong Jin, and Yulin Feng. Dynamic evolutions based on ontologies. *Knowledge-Based Systems*, 20(1):98–109, 2007.
- [MMCG95] Nancy Paule Melone, Timothy W McGuire, Lawrence Wai Chan, and Timothy A Gerwing. Effects of dss, modeling, and exogenous factors on decision quality and confidence. In *System Sciences, 1995. Proceedings of the Twenty-Eighth Hawaii International Conference on*, volume 3, pages 152–159. IEEE, 1995.
- [MMV⁺12] Paolo Priore Moreno, C Martínez, V Villanueva, J Lozano, and I Fernández. Aplicación de la metodología grasp al problema de rutificación de vehículos (vrp). In *XVI Congreso de Ingeniería de Organización: Vigo, 18 a 20 de julio de 2012*, pages 750–757, 2012.
- [MNHA09a] SS Mousavi, FG Nezami, M Heydar, and MB Aryanejad. A hybrid fuzzy group decision making and factor analysis for selecting maintenance strategy. In *Computers & Industrial Engineering, 2009. CIE 2009. International Conference on*, pages 1204–1209. IEEE, 2009.
- [MNHA09b] SS Mousavi, FG Nezami, M Heydar, and MB Aryanejad. A hybrid fuzzy group decision making and factor analysis for selecting maintenance strategy. In *Computers & Industrial Engineering, 2009. CIE 2009. International Conference on*, pages 1204–1209. IEEE, 2009.
- [MP12] Philip Moore and Hai V Pham. Intelligent context with decision support under uncertainty. In *Complex, Intelligent and Software Intensive Systems (CISIS), 2012 Sixth International Conference on*, pages 977–982. IEEE, 2012.

-
- [MPGSL06a] J Mula, R Poler, JP Garcia-Sabater, and FC Lario. Models for production planning under uncertainty: A review. *International journal of production economics*, 103(1):271–285, 2006.
- [MPGSL06b] J Mula, R Poler, JP Garcia-Sabater, and FC Lario. Models for production planning under uncertainty: A review. *International journal of production economics*, 103(1):271–285, 2006.
- [MS74] JM Martín-Sánchez. *Contribución a los sistemas adaptativos con modelo de referencia a partir de la teoría de la hiperestabilidad*. PhD thesis, Ph. D. thesis, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, Spain, 1974.
- [MS08] Joao Marques-Silva. Practical applications of boolean satisfiability. In *Discrete Event Systems, 2008. WODES 2008. 9th International Workshop on*, pages 74–80. IEEE, 2008.
- [MS09a] Gur Mosheiov and Assaf Sarig. Scheduling a maintenance activity to minimize total weighted completion-time. *Computers & Mathematics with Applications*, 57(4):619–623, 2009.
- [MS09b] Gur Mosheiov and Assaf Sarig. Scheduling a maintenance activity to minimize total weighted completion-time. *Computers & Mathematics with Applications*, 57(4):619–623, 2009.
- [MZM84] E Mosca, G Zappa, and C Manfredi. Multistep horizon self-tuning controllers: the musmar approach. In *IFAC 9th World Congress, Budapest, Hungary*, 1984.
- [NA10] Leila Nemmiche-Alachaher. Contextual approach to data discretization. In *Computing in the Global Information Technology (ICCGI), 2010 Fifth International Multi-Conference on*, pages 35–40. IEEE, 2010.
- [NAS00a] Reliability Centered Maintenance NASA. Guide for facilities and collateral equipment, 2000.
- [NAS00b] Reliability Centered Maintenance NASA. Guide for facilities and collateral equipment, 2000.
- [NC10a] Joel A Nachlas and C Richard Cassady. A general framework for modeling equipment aging. In *Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2010 Proceedings-Annual*, pages 1–6. IEEE, 2010.
- [NC10b] Joel A Nachlas and C Richard Cassady. A general framework for modeling equipment aging. In *Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2010 Proceedings-Annual*, pages 1–6. IEEE, 2010.

- [NDHMTK12] Nadjette Dendani-Hadiby Nadjette Dendani-Hadiby and Mohamed Tarek Khadir Mohamed Tarek Khadir. A case based reasoning system based on domain ontology for fault diagnosis of steam turbines. *International Journal of Hybrid Information Technology*, 5(3):89–104, 2012.
- [Nic98a] Amanda Nicolson. A discussion of contextual variables and related terminology in behavior analysis. *Behavioral Development Bulletin*, 7(1):25, 1998.
- [Nic98b] Amanda Nicolson. A discussion of contextual variables and related terminology in behavior analysis. *Behavioral Development Bulletin*, 7(1):25, 1998.
- [NK09a] Abolghasem Sadeghi Niaraki and Kyeheyun Kim. Ontology based personalized route planning system using a multi-criteria decision making approach. *Expert Systems with Applications*, 36(2):2250–2259, 2009.
- [NK09b] Abolghasem Sadeghi Niaraki and Kyeheyun Kim. Ontology based personalized route planning system using a multi-criteria decision making approach. *Expert Systems with Applications*, 36(2):2250–2259, 2009.
- [Nor13] Antonio Cala; Marco Schorlemmer; Pablo Noriega. Prototipo de un modulo de busqueda semantica para la plataforma greenidi. Technical report, Green IDI, IIIA-CSIC, 2013. Acceso: 15/8/2015.
- [NS13a] Nathan D Niese and David J Singer. Strategic life cycle decision-making for the management of complex systems subject to uncertain environmental policy. *Ocean Engineering*, 72:365–374, 2013.
- [NS13b] Nathan D Niese and David J Singer. Strategic life cycle decision-making for the management of complex systems subject to uncertain environmental policy. *Ocean Engineering*, 72:365–374, 2013.
- [Nut00] Paul C Nutt. Context, tactics, and the examination of alternatives during strategic decision making. *European Journal of Operational Research*, 124(1):159–186, 2000.
- [Nys08] Birre Nyström. *Aspects of improving punctuality*. PhD thesis, PhD thesis, Luleå University of Technology, 2008.
- [O+06] World Health Organization et al. Communicable disease surveillance and response systems: guide to monitoring and evaluating. 2006.

-
- [O⁺11] Johan Oscar Ong et al. Vehicle routing problem with backhaul, multiple trips and time window. *Jurnal Teknik Industri*, 13(1):1–10, 2011.
- [OAR11] Ville Ojanen, Toni Ahonen, and Markku Reunanen. Availability and sustainability as value elements in assessing customer value of an industrial service. In *Technology Management in the Energy Smart World (PICMET), 2011 Proceedings of PICMET'11.*; pages 1–11. IEEE, 2011.
- [OKK] VID OGRIS, TOMAŽ KRISTAN, and DAVORIN KOFJAČ. Modified adaptive evolutionary algorithm for solving jssp problems.
- [Ols06] Nils Olsson. *Project flexibility in large engineering projects*. PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2006.
- [OPN12] Sebastian Olbrich, Jens Poppelbuß, and Björn Niehaves. Critical contextual success factors for business intelligence: A delphi study on their relevance, variability, and controllability. In *System Science (HICSS), 2012 45th Hawaii International Conference on*, pages 4148–4157. IEEE, 2012.
- [P⁺01] Diego J Pedregal et al. Analysis of economic cycles using unobserved components models. *Review on Economic Cycles*, 2(1), 2001.
- [Pat09] Ambika Prasad Patra. *Maintenance decision support models for railway infrastructure using RAMS and LCC analyses*. 2009.
- [PBL96] Laure Papoz, Beverley Balkau, and Joseph Lellouch. Case counting in epidemiology: limitations of methods based on multiple data sources. *International Journal of Epidemiology*, 25(3):474–478, 1996.
- [PCRR⁺04a] Manel Poch, Joaquim Comas, Ignasi Rodriguez-Roda, Miquel Sanchez-Marre, and Ulises Cortés. Designing and building real environmental decision support systems. *Environmental Modelling & Software*, 19(9):857–873, 2004.
- [PCRR⁺04b] Manel Poch, Joaquim Comas, Ignasi Rodriguez-Roda, Miquel Sanchez-Marre, and Ulises Cortés. Designing and building real environmental decision support systems. *Environmental Modelling & Software*, 19(9):857–873, 2004.
- [Pel02] Martha Pelaez. Causes of behavior development and contextual variables. *Behavioral Development Bulletin*, 11(1):9, 2002.
- [PJERSF11] Sabino Pariente Juarez, Hugo Estrada Esquivel, Alicia Martínez Rebolgar, and Mari Carmen Suárez-Figueroa. Creado—a methodology to create domain ontologies using parameter-based ontology merging

- techniques. In *Artificial Intelligence (MICAI), 2011 10th Mexican International Conference on*, pages 23–28. IEEE, 2011.
- [PLC98a] Vassilis M Papadakis, Spyros Lioukas, and David Chambers. Strategic decision-making processes: the role of management and context. *Strategic management journal*, 19(2):115–147, 1998.
- [PLC98b] Vassilis M Papadakis, Spyros Lioukas, and David Chambers. Strategic decision-making processes: the role of management and context. *Strategic management journal*, 19(2):115–147, 1998.
- [PNGBP97] M Pelaez-Nogueras, J Gewirtz, DM Baer, and EM Pinkston. The context of stimulus control in behavior analysis. *Environment and behavior*, pages 30–42, 1997.
- [PPCJ11] Prashant Palvia, Praveen Pinjani, Sherrie Cannoy, and Tim Jacks. Contextual constraints in media choice: Beyond information richness. *Decision Support Systems*, 51(3):657–670, 2011.
- [PS14] KG Papakonstantinou and M Shinozuka. Planning structural inspection and maintenance policies via dynamic programming and markov processes. part i: Theory. *Reliability Engineering & System Safety*, 130:202–213, 2014.
- [PSOF⁺11] Susanna Pantsar-Syv.^aniemi, Eila Ovaska, Susanna Ferrari, Tullio Salmon Cinotti, Guido Zamagni, Luca Roffia, Sandra Mattarozzi, and Valerio Nannini. Case study: Context-aware supervision of a smart maintenance process. In *Applications and the Internet (SAINT), 2011 IEEE/IPSJ 11th International Symposium on*, pages 309–314. IEEE, 2011.
- [PTG⁺92] Steve L Purucker, Bruce E Tonn, RT Goeltz, RD James, S Kercel, DT Rizy, ML Simpson, and JW Van Dyke. Feasibility study: Application of rcm techniques for substation maintenance at the bonneville power administration.[reliability centered maintenance (rcm)]. Technical report, Oak Ridge National Lab., TN (United States), 1992.
- [PZM12a] Mayank Pandey, Ming J Zuo, and Ramin Moghaddass. Selective maintenance for binary systems using age-based imperfect repair model. In *Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (ICQR2MSE), 2012 International Conference on*, pages 385–389. IEEE, 2012.
- [PZM12b] Mayank Pandey, Ming J Zuo, and Ramin Moghaddass. Selective maintenance for binary systems using age-based imperfect repair model. In *Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Enginee-*

- ring (ICQR2MSE)*, 2012 International Conference on, pages 385–389. IEEE, 2012.
- [QGDC⁺11] Viviana Elizabet Quincoces, María del Pilar Gálvez Díaz, NR Cáceres, Ariel Vega, CV Brouchy, EC Velázquez, OM González, and AN Guzmán. Desarrollo de software sensible al contexto. In *XIII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*, 2011.
- [RA12] M. Radenen and T. Artieres. Contextual hidden markov models. In *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2012 IEEE International Conference on*, pages 2113–2116, March 2012.
- [RAB04] Rami Rifaieh, Ahmed Arara, and A-N Benharkat. A view of enterprise information systems based on contextual ontologies. In *Computational Cybernetics, 2004. ICC 2004. Second IEEE International Conference on*, pages 259–264. IEEE, 2004.
- [Ran88] Graham K Rand. Vehicle routing: Methods and studies (studies in management science and systems, volume 16). *Journal of the Operational Research Society*, 39(10):979–980, 1988.
- [Ras11] Rasmus Rasmussen. Tsp in spreadsheets—a guided tour. *International Review of Economics Education*, 10(1):94–116, 2011.
- [Riv98a] Robert E Rivier. Ecotrack—a tool for track maintenance and renewal managers. *Computers in Railways VI*, pages 733–742, 1998.
- [Riv98b] Robert E Rivier. Ecotrack—a tool for track maintenance and renewal managers. In *Conference proceedings COMPRAIL*, volume 98, 1998.
- [Riv98c] Robert E Rivier. Ecotrack—a tool for track maintenance and renewal managers. In *Conference proceedings COMPRAIL*, volume 98, 1998.
- [Rob01] Arthur J Robson. Why would nature give individuals utility functions? *Journal of Political Economy*, 109(4):900–914, 2001.
- [Roo01] John Peter Rooney. Iec61508: an opportunity for reliability. In *Reliability and Maintainability Symposium, 2001. Proceedings. Annual*, pages 272–277. IEEE, 2001.
- [RPKC11] Catherine Roussey, Francois Pinet, Myoung Ah Kang, and Oscar Corcho. An introduction to ontologies and ontology engineering. In *Ontologies in Urban Development Projects*, pages 9–38. Springer, 2011.
- [RS82] José Rodellar and Juan Antonio Martín Sánchez. *Diseño óptimo del bloque de consigna en el sistema de control adaptativo-predictivo*. Universidad. Facultad de Física, 1982.

- [RS07] Arthur J Robson and Larry Samuelson. The evolution of intertemporal preferences. *The American economic review*, pages 496–500, 2007.
- [RS08] Arthur J Robson and Balazs Szentes. Evolution of time preference by natural selection: Comment. *The American Economic Review*, 98(3):1178–1188, 2008.
- [RS09] Arthur J Robson and Larry Samuelson. The evolution of time preference with aggregate uncertainty. *The American Economic Review*, 99(5):1925–1953, 2009.
- [SA05] Luis Carlos Silva Ayçaguer. Una ceremonia estadística para identificar factores de riesgo. *Salud colectiva*, 1(3):309–322, 2005.
- [SA08] Jaroslaw Sugier and George J Anders. Verification of markov models of ageing power equipment. In *Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2008. PMAPS'08. Proceedings of the 10th International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2008.
- [Sam01] Larry Samuelson. Introduction to the evolution of preferences. *Journal of Economic Theory*, 97(2):225–230, 2001.
- [San04] EL Sanjuán. *Estudio de la fiabilidad de sistemas con reparaciones pospuestas*. PhD thesis, Universidad de Extremadura, 2004.
- [SAW94] Bill Schilit, Norman Adams, and Roy Want. Context-aware computing applications. In *Mobile Computing Systems and Applications, 1994. WMCSA 1994. First Workshop on*, pages 85–90. IEEE, 1994.
- [SBG99] Albrecht Schmidt, Michael Beigl, and Hans-W Gellersen. There is more to context than location. *Computers & Graphics*, 23(6):893–901, 1999.
- [SBR98] MJ Sprenger, PA Bootsma, and Ralf Reintjes. [surveillance of communicable diseases in the european union]. *Nederlands tijdschrift voor geneeskunde*, 142(44):2418–2423, 1998.
- [Sch98a] Leonardo Schvarstein. *Diseño de organizaciones: tensiones y paradojas*. Paidós Buenos Aires, 1998.
- [Sch98b] Leonardo Schvarstein. *Diseño de organizaciones: tensiones y paradojas*. Paidós Buenos Aires, 1998.
- [Ser10] José Serlin. *Conocimiento de la gestión de las organizaciones: Sistemas complejos dinámicos inestables adaptativos*. PhD thesis, Tesis doctoral, Buenos Aires, Facultad de Ciencias Económicas de la Universidad de Buenos Aires [en línea] <http://www.econ.uba>.

-
- ar/www/servicios/Biblioteca/bibliotecadigital/bd/tesis_doc/serlin.pdf. pdf, 2010.
- [SFU08] R Shingler, G Fadin, and P Umiliacchi. From rcm to predictive maintenance: The integrail approach. 2008.
- [SH09] Y Shafahi and R Hakhamaneshi. Application of a maintenance management model for iranian railways based on the markov chain and probabilistic dynamic programming. *International Journal of Science and Technology. Transaction A: Civil Engineering*, 16(1):87–97, 2009.
- [Sim57] H.A. Simon. *Models of man: social and rational; mathematical essays on rational human behavior in society setting*. Wiley, 1957.
- [Sim77] Herbert A Simon. On the definition of the causal relation. In *Models of Discovery*, pages 81–92. Springer, 1977.
- [Sim82] Herbert Alexander Simon. *Models of bounded rationality: Empirically grounded economic reason*, volume 3. MIT press, 1982.
- [SIM12] Muhammad Habibullah Siddiqui, Assad Iqbal, and Irfan Anjum Manarvi. Maintenance resource management: A key process initiative to reduce human factors in aviation maintenance. In *Aerospace Conference, 2012 IEEE*, pages 1–7. IEEE, 2012.
- [SLJ07a] Kim Bang Salling, Steen Leleur, and Anders Vestergaard Jensen. Modelling decision support and uncertainty for large transport infrastructure projects: The clg-dss model of the øresund fixed link. *Decision Support Systems*, 43(4):1539–1547, 2007.
- [SLJ07b] Kim Bang Salling, Steen Leleur, and Anders Vestergaard Jensen. Modelling decision support and uncertainty for large transport infrastructure projects: The clg-dss model of the øresund fixed link. *Decision Support Systems*, 43(4):1539–1547, 2007.
- [SMCRP99] Miquel Sanchez-Marre, Ulises Cortés, Ignasi R Roda, and Manel Poch. Sustainable case learning for continuous domains. *Environmental Modelling & Software*, 14(5):349–357, 1999.
- [SN11a] A Syamsundar and Vallayil N Achutha Naikan. Imperfect repair proportional intensity models for maintained systems. *Reliability, IEEE Transactions on*, 60(4):782–787, 2011.
- [SN11b] A Syamsundar and Vallayil N Achutha Naikan. Imperfect repair proportional intensity models for maintained systems. *Reliability, IEEE Transactions on*, 60(4):782–787, 2011.

-
- [Sof02] Shoshanna Sofaer. Qualitative research methods. *International Journal for Quality in Health Care*, 14(4):329–336, 2002.
- [Sol] FJ Sols, A y Romero. Equipos y productos robustos y fiables: el análisis de mantenimiento centrado en la fiabilidad. online. Acceso: 15/8/2015.
- [SPKG11] Christer Stenström, Aditya Parida, Uday Kumar, and Diego Galar. Maintenance value drivers, killers and their indicators. In *1st International Conference on Maintenance Performance Measurement and Management (MPMM)*, pages 125–130, 2011.
- [SR05a] Juan M Martín Sánchez and José Rodellar. *Control adaptativo predictivo experto: Metodología, diseño y aplicación*. Universidad Nacional de Educación a Distancia, UNED, 2005.
- [SR05b] Juan M Martín Sánchez and José Rodellar. *Control adaptativo predictivo experto: Metodología, diseño y aplicación*. Universidad Nacional de Educación a Distancia, UNED, 2005.
- [SR14] Neil Gareth Shepherd and John Maynard Rudd. The influence of context on the strategic decision-making process: A review of the literature. *International Journal of Management Reviews*, 16(3):340–364, 2014.
- [SS97] João P Marques Silva and Karem A Sakallah. Grasp—a new search algorithm for satisfiability. In *Proceedings of the 1996 IEEE/ACM international conference on Computer-aided design*, pages 220–227. IEEE Computer Society, 1997.
- [SS04] Małgorzata Steinder and Adarshpal S Sethi. Probabilistic fault localization in communication systems using belief networks. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, 12(5):809–822, 2004.
- [SSR03] William E Stein, Darryl A Seale, and Amnon Rapoport. Analysis of heuristic solutions to the best choice problem. *European Journal of Operational Research*, 151(1):140–152, 2003.
- [Sta12] Paul Stack. Development of a mobile platform to support building maintenance engineering. In *Computer Software and Applications Conference Workshops (COMPSACW), 2012 IEEE 36th Annual*, pages 482–487. IEEE, 2012.
- [stea] Step by step optimization with solver excel. online. Acceso: 15/8/2015.

- [steb] Step by step optimization with solver excel. online. Acceso: 15/8/2015.
- [Sto11] ML Stockdale. El problema del viajante: un algoritmo heurístico y un aplicación. online, 2011. Acceso: 15/8/2015.
- [Su04] Chun-Lien Su. Transfer capability uncertainty computation. In *Power System Technology, 2004. PowerCon 2004. 2004 International Conference on*, volume 1, pages 586–591. IEEE, 2004.
- [SVKN10] A Syamsundar, E Vijay Kumar, and VNA Naikan. Imperfect repair accelerated failure time processes for maintained systems. In *Reliability, Safety and Hazard (ICRESH), 2010 2nd International Conference on*, pages 313–318. IEEE, 2010.
- [TAO⁺98a] Yoshiyuki Takaoka, Kousaku Asano, Mamoru Ohta, Michiaki Iwazume, Hideaki Takeda, Toyoaki Nishida, and Y Mizukami. A planning support document based system for transformer reparation task using ontology. In *Knowledge-Based Intelligent Electronic Systems, 1998. Proceedings KES'98. 1998 Second International Conference on*, volume 2, pages 35–44. IEEE, 1998.
- [TAO⁺98b] Yoshiyuki Takaoka, Kousaku Asano, Mamoru Ohta, Michiaki Iwazume, Hideaki Takeda, Toyoaki Nishida, and Y Mizukami. A planning support document based system for transformer reparation task using ontology. In *Knowledge-Based Intelligent Electronic Systems, 1998. Proceedings KES'98. 1998 Second International Conference on*, volume 2, pages 35–44. IEEE, 1998.
- [TEG⁺95] Samson W Tu, Henrik Eriksson, John H Gennari, Yuval Shahar, and Mark A Musen. Ontology-based configuration of problem-solving methods and generation of knowledge-acquisition tools: Application of protege-ii to protocol-based decision support. *Artificial intelligence in medicine*, 7(3):257–289, 1995.
- [TG88] Francisco Javier Tejedor Tejedor and José Antonio Caride Gómez. Influencia de las variables contextuales en el rendimiento académico. *Revista de educación*, (287):113–146, 1988.
- [Tié90] Félix Ramón Doldán Tié. *Introducción a la economía de la empresa*. 1990.
- [Tij03] Henk C Tijms. *A first course in stochastic models*. John Wiley and Sons, 2003.

- [TMK13] Pravin P Tambe, Satish Mohite, and Makarand S Kulkarni. Optimisation of opportunistic maintenance of a multi-component system considering the effect of failures on quality and production schedule: A case study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(5-8):1743–1756, 2013.
- [TR10] Cher Ming Tan and Nagarajan Raghavan. Imperfect predictive maintenance model for multi-state systems with multiple failure modes and element failure dependency. In *Prognostics and Health Management Conference, 2010. PHM'10.*, pages 1–12. IEEE, 2010.
- [Tri99] Jacques H Trienekens. *Management of Processes in Chains: A research framework*. Wageningen Universiteit, 1999.
- [Tsa00] Albert HC Tsang. *Maintenance performance management in capital intensive organizations*. PhD thesis, University of Toronto, 2000.
- [TSC07] Allison Tong, Peter Sainsbury, and Jonathan Craig. Consolidated criteria for reporting qualitative research (coreq): a 32-item checklist for interviews and focus groups. *International Journal for Quality in Health Care*, 19(6):349–357, 2007.
- [TTAK99a] Kazuki Tanooka, Hisashi Tamaki, Shigeo Abe, and Shinzo Kitamura. A continuous age model of genetic algorithms applicable to optimization problems with uncertainties. In *Systems, Man, and Cybernetics, 1999. IEEE SMC'99 Conference Proceedings. 1999 IEEE International Conference on*, volume 1, pages 637–642. IEEE, 1999.
- [TTAK99b] Kazuki Tanooka, Hisashi Tamaki, Shigeo Abe, and Shinzo Kitamura. A continuous age model of genetic algorithms applicable to optimization problems with uncertainties. In *Systems, Man, and Cybernetics, 1999. IEEE SMC'99 Conference Proceedings. 1999 IEEE International Conference on*, volume 1, pages 637–642. IEEE, 1999.
- [TWF01] Jiafu Tang, Dingwei Wang, and Richard YK Fung. Formulation of general possibilistic linear programming problems for complex industrial systems. *Fuzzy sets and systems*, 119(1):41–48, 2001.
- [ULRS11] Paolo Umiliacchi, David Lane, Felice Romano, and AnsaldoBreda SpA. Predictive maintenance of railway subsystems using an ontology based modelling approach. In *Proceedings of 9th world Conference on Railway Research, May*, pages 22–26, 2011.
- [VAS05] Leonilde Varela, Joaquim Aparício, and Carmo Silva. Production scheduling concepts modeling through xml, 2005.

-
- [VBGSVT09] Luis Manuel Vilches-Blázquez, A García-Silva, and B Villazón-Terrazas. Construcción de ontologías a partir de tesauros. 2009.
- [VF⁺09] Noé Villegas Flores et al. Análisis de valor en la toma de decisiones aplicado a carreteras. 2009.
- [Vid] A Vidal. Algoritmos heurísticos en optimización. Master’s thesis. Acceso: 15/8/2015.
- [Visa] I Vissani. Un sat-solver paralelo y distribuido con herencia de cláusulas aprendidas. online. Acceso: 15/8/2015.
- [Visb] I Vissani. Un sat-solver paralelo y distribuido con herencia de cláusulas aprendidas. online. Acceso: 15/8/2015.
- [VL11] José Felipe Villanueva López. *Optimización Evolutiva y Multiobjetivo en base a criterios RAMS+ C para Centrales Nucleares*. PhD thesis, 2011.
- [VSCA11] Pradeep Varakantham, Nathan Schurr, Alan Carlin, and Christopher Amato. Decision support in organizations: A case for orgpomdps. In *Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT), 2011 IEEE/WIC/ACM International Conference on*, volume 2, pages 163–170. IEEE, 2011.
- [W⁺03] TD Wilson et al. {On conceptual models for information seeking and retrieval research}. *Information research*, 9(1):9–1, 2003.
- [WBO12] Brett Williams, Ted Brown, and Andrys Onsman. Exploratory factor analysis: A five-step guide for novices. *Australasian Journal of Paramedicine*, 8(3):1, 2012.
- [Wil00] H Lee Willis. *Distributed power generation: planning and evaluation*. CRC Press, 2000.
- [WJD02] Les Warrington, Jeffery A Jones, and Neil Davis. Modelling of maintenance, within discrete event simulation. In *Reliability and Maintainability Symposium, 2002. Proceedings. Annual*, pages 260–265. IEEE, 2002.
- [WL05a] Reay-Chen Wang and Tien-Fu Liang. Applying possibilistic linear programming to aggregate production planning. *International Journal of Production Economics*, 98(3):328–341, 2005.
- [WL05b] Reay-Chen Wang and Tien-Fu Liang. Applying possibilistic linear programming to aggregate production planning. *International Journal of Production Economics*, 98(3):328–341, 2005.

- [WTW10] Dian Wang, WH Tang, and QH Wu. Ontology-based fault diagnosis for power transformers. In *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, pages 1–8. IEEE, 2010.
- [XFYJK08a] Dong Xiao-Feng, Gu Yu-Jiong, and Yang Kun. Study on intelligent maintenance decision support system using for power plant equipment. In *Automation and Logistics, 2008. ICAL 2008. IEEE International Conference on*, pages 96–100. IEEE, 2008.
- [XFYJK08b] Dong Xiao-Feng, Gu Yu-Jiong, and Yang Kun. Study on intelligent maintenance decision support system using for power plant equipment. In *Automation and Logistics, 2008. ICAL 2008. IEEE International Conference on*, pages 96–100. IEEE, 2008.
- [XFYJK08c] Dong Xiao-Feng, Gu Yu-Jiong, and Yang Kun. Study on intelligent maintenance decision support system using for power plant equipment. In *Automation and Logistics, 2008. ICAL 2008. IEEE International Conference on*, pages 96–100. IEEE, 2008.
- [Yan10] Xin-She Yang. *Nature-inspired metaheuristic algorithms*. Luniver press, 2010.
- [YSC08] Pingjian Yu, Joon Jin Song, and C Richard Cassady. Parameter estimation for a repairable system under imperfect maintenance. In *Reliability and Maintainability Symposium, 2008. RAMS 2008. Annual*, pages 428–433. IEEE, 2008.
- [Yu98] Chunyan Yu. The effects of exogenous variables in efficiency measurement—a monte carlo study. *European Journal of Operational Research*, 105(3):569–580, 1998.
- [Zac07] Michael H Zack. The role of decision support systems in an indeterminate world. *Decision Support Systems*, 43(4):1664–1674, 2007.
- [ZPGB08] Elmar Zeeb, S Priiter, Frank Golatowski, and Frank Berger. A context aware service-oriented maintenance system for the b2b sector. In *Advanced Information Networking and Applications-Workshops, 2008. AINAW 2008. 22nd International Conference on*, pages 1381–1386. IEEE, 2008.