UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

TESIS DOCTORAL

IMPACTO DE LA INGENIERÍA HOSPITALARIA EN LOS PROCESOS ASISTENCIALES Y DE MANTENIMIENTO. UNA VISIÓN ESTRATÉGICA Y DE VALOR AÑADIDO

JUAN AUNIÓN VILLA

PROGRAMA DE DOCTORADO MODELIZACIÓN Y EXPERIMENTACIÓN EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

2021

UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

TESIS DOCTORAL

IMPACTO DE LA INGENIERÍA HOSPITALARIA EN LOS PROCESOS ASISTENCIALES Y DE MANTENIMIENTO. UNA VISIÓN ESTRATÉGICA Y DE VALOR AÑADIDO

JUAN AUNIÓN VILLA

PROGRAMA DE DOCTORADO MODELIZACIÓN Y EXPERIMENTACIÓN EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

2021

CONFORMIDAD DEL DIRECTOR

FDO.: JUSTO GARCÍA SANZ-CALCEDO

AGRADECIMIENTOS

Hacer un trabajo como este ha sido un esfuerzo compartido. Hay personas que han participado en las etapas previas a la decisión de hacer esta investigación, consolidando la base de conocimientos y otras han formado parte del proceso. Todas ellas importantes para conseguir el objetivo.

Agradezco a Esther y Valeria la compresión por todo el tiempo de familia que he tenido que dedicar a este trabajo y la motivación para acabarlo. Ellas han estado presentes en todas las etapas y de alguna forma siento que estaré en deuda con ellas por siempre.

Agradezco a Miguel Gómez Chaparro como compañero en este proceso y por ser la persona que me llevó a conocer al Director de esta Tesis, Justo.

Agradezco a Justo García Sanz-Calcedo, la dedicación, acompañamiento, consejos y motivación en tiempos más bajos para poder acabar este trabajo. Su conocimiento de la Ingeniería Hospitalaria y su trayectoria docente e investigadora han sido guías esenciales para conducir esta tesis.

Agradezco a Carlos Jiménez invitarme a levantar la vista y comprobar que existen otros horizontes y sobre todo demostrarme que son accesibles. He comprendido gracias a él la importancia conocer a otras personas y tejer redes entre iguales.

Agradezco a mi padre y a mi madre el esfuerzo realizado para poder llegar a ser ingeniero. Esta formación y profesión se ha fundido con mi personalidad y ahora son indisolubles.

Agradezco los años de aprendizaje en HM Hospitales de la especialización en Ingeniería Hospitalaria y a todos los amigos y compañeros que han hecho ese camino a mi lado.

Agradezco a Abraham Otero la oportunidad que me dio de ser docente universitario y la confianza que demostró tener en mí para realizar este trabajo. Estos años de universidad han sido un elemento de transformación personal.

RESUMEN

Los hospitales son entornos altamente tecnificados con gran de dependencia de los suministros energéticos, instalaciones y equipamiento electromédico. En su concepción técnica más básica, el sistema hospitalario es viable gracias a que la intervención del personal de mantenimiento y de los proveedores externos restaura la funcionalidad original de los equipos e instalaciones cuando se producen averías. Sin embargo, esta función resulta limitada ante determinadas necesidades que los responsables de los procesos y gestores de los hospitales requieren del área técnica. Para atender esta demanda surge la especialidad denominada Ingeniería Hospitalaria, reconocida internacionalmente como Healthcare Engineering.

Este trabajo se centra en evaluar cómo la función de Ingeniería Hospitalaria contribuye a la mejora de las áreas asistenciales y de gestión del conjunto del sistema. Para ello se utiliza la información de mantenimiento y el conocimiento que genera su presencia transversal en la mayoría de los procesos hospitalarios, para aportar valor añadido. Con este fin se analizan las relaciones entre la operativa de mantenimiento y otras variables de tipo asistencial para correlacionar el número de averías, tiempos de resolución de incidencias y costes con variables de infraestructura y número de actos médicos.

Estas relaciones permiten obtener información de mantenimiento, basada en parámetros de fácil obtención, que puede ser usada por los responsables de otras áreas como compras, finanzas o gerencia para la toma de decisiones estratégicas y de largo plazo. Los resultados demuestran una alta correlación entre el número de incidencias y costes de mantenimiento con el número de camas, quirófanos, personal de enfermería y valor de compra del equipamiento electromédico, así como número de ingresos, cirugías y tiempo de estancia hospitalaria. A través de los modelos de regresión propuestos, se pueden estimar las variables de mantenimiento usando los datos de infraestructuras y otros de tipo asistencial.

Además, se emplea la metodología *Lean*, aplicándola a la optimización de los procesos asistenciales, concretamente las pruebas de resonancia nuclear magnética. Los resultados muestran que aplicando las soluciones propuestas es posible reducir el tiempo realización de un estudio en un equipo de diagnóstico por imagen de alta tecnología, eliminado aquellas tareas que no aportan valor o que consumen recursos y aumentando así la calidad del servicio.

Por último, se realiza la explotación de los datos almacenados en el *software* de gestión de mantenimiento de los hospital con el fin de proporcionar información a otras áreas que ayuden a la toma de decisiones. Este análisis aporta

información sobre planes de renovación, obsolescencia, gasto, inversión, uso del equipamiento y contratos. Para ello se proponen una serie de indicadores aplicables a equipos individuales o agrupaciones basadas en la funcionalidad y en el departamento con el fin establecer criterios de ordenación para la toma de decisiones. Los resultados muestran el estado del parque de equipos en función de los indicadores definidos.

Los dispositivos con alto nivel de obsolescencia, baja calidad del servicio, mal desempeño del mantenedor externo y alcance de contrato inadecuado son analizados para encontrar las causas que lo provocan y proponer soluciones tanto para el área de ingeniería como para otras de tipo asistencial y/o apoyo. Esta información es útil para el conjunto del sistema sanitario, ya que afecta a su sostenibilidad a largo plazo.

Los resultados de esta Tesis Doctoral aportan soluciones de valor añadido al área de ingeniería y mantenimiento de equipos electromédicos, así como a otros departamentos como compras, finanzas o gerencia. Se ha comprobado que es posible incrementar la eficiencia en un proceso asistencial hasta un 12%, aplicando conjuntamente técnicas de Ingeniería Hospitalaria y metodología *Lean*.

Conviene destacar que, hasta el momento de finalización de la Tesis, se han publicado cuatro artículos en revistas indexadas en Journal Citation Report (Science Citation Index Expanded), derivadas directamente de los resultados de esta investigación, todas con elevado índice de impacto: una en primer cuartil, dos en segundo cuartil y la última en tercer cuartil. A través de estas publicaciones es posible conocer, y sobre todo controlar, el impacto real de la Ingeniería Hospitalaria en los procesos propio de un hospital.

ABSTRACT

Hospitals are highly technical environments with great dependence on energy supplies, facilities and medical equipment. In its most basic technical conception, a hospital system is viable thanks to maintenance personnel and external suppliers intervention. They restore the original functionality of the equipment and facilities when failures occur. However, this function is limited to certain needs that process owners and hospital managers require from the technical department. To meet this demand, Hospital Engineering function, internationally recognized as Healthcare Engineering, arises.

This study is focussed on how Hospital Engineering as a function contributes to care and system management improvement. In order to ensure this contribution, maintenance information and knowledge generated by its transversal presence in most hospital processes, are used to create added value to the organization. To this end, the relationships between operations and maintenance costs are analyzed with other healthcare variables to correlate the number of breakdowns, times to repair, and costs with infrastructure variables such as building areas, number of beds or operating rooms, as well as with healthcare variables such as consultations, admissions or surgeries.

The above mentioned relationships, help facilitate maintenance information based on easily obtained data, which can be used by those responsible for other areas such as purchasing, finance or management to make long-term and strategic decisions. Results show high correlation between number of incidents and maintenance costs with the number of beds, operating rooms, nursing staff and medical equipment value, as well as with admissions, surgeries and hospitalization length of stay. Through proposed regression models, maintenance variables can be estimated from infraestructure and medical activity data.

Lean methodology is used in order to opimize healthcare processes, takin out waste from them. Examples can be found in magnetic resonance agenda´s management, takint into consideration coils needed for each type of exam reducing non added value change times. Results prove through Lean it´s possible to reduce the time needed to carry out diagnostic stydies by eliminating those tasks that do not add value and also by proposing ways to improve quality of service.

Finally, maintenance management software stored data is used to ensure information streams to other areas in order tu support them in their decision-making processes. This feed provides insights on obsolescence, expenses, investment, use of equipment, contracts and ultimately renovation plans. For this,

indicators applicable to individual teams or functionality or department groups, are recomended for decision-making. Results show equipment installed based state based on the above mentinoed KPIs.

Obsolete equipment, low quality of service, maintenance suppliers poor performance and inadequate service contract´s scope are analyzed with a problem solving approach to comply with engineering and medical areas needs. This information is useful for the health system as a whole, since it affects its long-term sustainability.

This Doctoral Thesis results provide value-added solutions to hospital engineering departments, as well as to others like procurement, finance or management. It has been proven that it is possible to increase efficiency in a healthcare process up to 12%, by applying Hospital Engineering techniques and Lean methodology.

During the execution of this doctoral thesis, four articles have been published in journals indexed in the Journal Citation Report (Science Citation Index Expanded), directly related to this research, all with high impact index: one in first quartile, two in second quartile and the last one in third quartile. Through these publications it is possible to know and even control, the real impact of hospital engineering as a funtion on healthcare delivery processes.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 11

1.1 La Ingeniería en los hospitales 11

1.1.1 Optimización del proceso hospitalario 13
1.1.2 Relación del mantenimiento con otros procesos hospitalarios 17
1.1.3 Uso estratégico de la información de mantenimiento 20

1.2 Enfoque de sistemas en el entorno hospitalario 23

2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA 27

2.1 Objetivos 27

2.1.1 Objetivo general 27
2.1.2 Objetivos específicos 27
2.1.3 Objetivos complementarios 28

2.2 Metodología 29

2.2.1 Análisis muestral 29
2.2.2 Bases de datos 30
2.2.3 Variables de medición de los procesos 38
2.2.4 Herramientas matemáticas 40
2.2.5 Procedimientos y documentación del sistema 42
2.2.6 Programas y desarrollos informáticos 43

3. TÉCNICAS Y HERRAMIENTAS APLICADAS 47

3.1 Herramientas Lean 47

3.1.1 La herramienta A3 50
3.1.2 Takt time 53
3.1.3 Gemba 54
3.1.4 Herramienta VSM 55
3.1.5 Espagueti chart 59

3.2 Herramientas de proyectos 60

3.2.1 Matriz de impacto accesibilidad 60
3.2.2 Gestión de proyectos 61

4. RESULTADOS 63

4.1 Optimización de procesos de equipos de alta tecnología 63

4.1.1 Entorno y demanda 63
4.1.2 Situación inicial 68
4.1.3 Análisis de ineficiencias 71
4.1.4 Situación propuesta 75
4.1.5 Plan de acción 84
4.1.6 Herramienta A3 85
4.1.7 Implantación de las soluciones 86

4.2 Análisis de correlación entre el mantenimiento y otras variables hospitalarias 91

4.2.1 Variables analizadas 91

4.2.2 Modelos de regresión simple 92
4.2.3 Relaciones según variables de recursos 95
4.2.4 Relaciones según uso de recursos por el paciente 102
4.2.5 Modelos de regresión multivariable 109
4.2.6 Análisis estadístico de varianza del tiempo de resolución de incidencias 111
4.2.7 Indicadores de referencia 112

4.3 Los datos de mantenimiento como fuente de información estratégica 114
4.3.1 Descripción de las bases de datos 114
4.3.2 Descripción del modelo 123
4.3.3 Análisis de los resultados de métricas 146
4.3.4 Análisis de los resultados por indicador 164
4.3.5 Valor añadido para otros procesos 196

5. CONCLUSIONES 197

5.1 Conclusiones generales 197

5.2 Conclusiones específicas 198

5.3 Líneas futuras de trabajo 200

6. BIBLIOGRAFÍA 201

7. ANEXOS 215

I. Artículos publicados en revistas indexadas 215
I.1 Maintenance in hospitals with less than 200 beds: efficiency indicators 215
I.2 Assessment of the maintenance costs of electro-medical equipment in Spanish hospitals 230
I.3 Study of the energy intensity by built areas in a medium-sized Spanish hospital 243
I.4 Markov model of computed tomography equipment 259

II. Libros y capítulos de libro 271
II.1 Recomendaciones de actuación para servicios técnicos en hospitales durante la crisis sanitaria por el Covid-19 (SARS-COV-2) 271

III. Participación en congresos 272
III.1 CFD applied to the design and optimization of hospital critical room air conditioning 272
III.2 Prevention and control of Legionella in water system in private hospitals 272
III.3 Aplicability of statistical techniques based on Markov chains in engineering 273
III.4 Gamification through ICT questionnaires as a learning methodology in graphic expression subjects 273
III.5 Flipped learning methodology adapted for application in graphical engineering 274
III.6 Implementing project-based learning through BIM technology 274
III.7 Evaluation of the adquisition value of electromedical equipment in relation to infraestructure healthcare and energy consumption in hospitals 275
III.8 Application of the flipped learning methodology as a tool for educational innovation in project engineering 275

III.9 Optimisation of CO2 emissions from the construction of healthcare buildings using 6D BIM technology.....276

IV. Descripción de Proyecto de Investigación Industrial *277*

IV.1 Evaluación de la gestión del acceso vascular.....277

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. El sistema y sus elementos. Fuente propia 23
Figura 2. Modelo de A3. Fuente propia 52
Figura 3. Ejemplo de VSM clásico 57
Figura 4. Ejemplo de VSM administrativo. Fuente propia 58
Figura 5. Croquis zona de zona de estudio para *espagueti chart*. Fuente propia 59
Figura 6. Matriz de impacto accesibilidad. Fuente propia 60
Figura 7. Diagrama de flujo del servicio de DIM. Fuente propia 63
Figura 8. VSM del proceso de resonancia magnética. Fuente propia 68
Figura 9. *Espagueti chart*. Fuente propia 70
Figura 10. Matriz de impacto accesibilidad. Fuente propia 76
Figura 11. Matriz de impacto accesibilidad con soluciones. Fuente propia 80
Figura 12. VSM de la solución propuesta. Fuente propia 83
Figura 13. Mapa de transformación. Fuente propia 84
Figura 14. Resultado A3. Fuente propia 85
Figura 15. Análisis de la relación entre los costes mantenimiento, número de incidencias y la superficie del hospital 95
Figura 16. Análisis de la relación entre los costes mantenimiento, número de incidencias y el número de camas del hospital 96
Figura 17. Análisis de la relación entre los costes mantenimiento, número de incidencias y el número de quirófanos del hospital 97
Figura 18. Análisis de la relación entre los costes mantenimiento, número de incidencias y el número de recursos de enfermería 98
Figura 19. Análisis de la relación entre los costes mantenimiento, número de incidencias y el valor del equipamiento electromédico 99
Figura 20. Análisis de la relación entre los costes mantenimiento, número de incidencias y la antigüedad del equipamiento electromédico 100
Figura 21. Análisis de la relación entre los costes mantenimiento, número de incidencias y la antigüedad del edificio 101
Figura 22. Análisis de la relación entre los costes mantenimiento, número de incidencias y el número de consultas 102
Figura 23. Análisis de la relación entre los costes mantenimiento, número de incidencias y el número de pruebas diagnósticas 103
Figura 24. Análisis de la relación entre los costes mantenimiento, número de incidencias y el número de urgencias 104
Figura 25. Análisis de la relación entre los costes mantenimiento, número de incidencias y el número de ingresos 105
Figura 26. Análisis de la relación entre los costes mantenimiento, número de incidencias y el número de cirugías con ingreso 106
Figura 27. Análisis de la relación entre los costes mantenimiento, número de incidencias y el número de cirugías ambulantes 107
Figura 28. Análisis de la relación entre los costes mantenimiento, número de incidencias y el tiempo de estancia 108
Figura 29. Gráfico de probabilidad normal 110
Figura 30. Número de equipos clasificados según la familia a la que pertenece 114
Figura 31. Valor de compra de equipos de electromedicina según familia 115

Figura 32. Proporción de Valor de compra de equipos según familia 115
Figura 33. Número de equipos por tipología 116
Figura 34. Valor de compra de los equipos por tipología 117
Figura 35. Número de equipos por departamento 118
Figura 36. Valor de compra de los equipos por departamento 119
Figura 37. Número de equipos según alcance de contrato 120
Figura 38. Valor de compra de los equipos según alcance de contrato 120
Figura 39. Evolución de base instalada de equipos entre 2007-2020 121
Figura 40. Evolución valor de compra del equipamiento y coste de mantenimiento 122
Figura 41. Valores de referencia de la antigüedad (M1) 131
Figura 42. Valores de referencia de número de correctivos (desde el alta) (M2) 131
Figura 43. Valores de referencia de coste medio de correctivos (desde el alta) (M4) 132
Figura 44. Valores de referencia de número medio anual de correctivos (M4) 132
Figura 45. Valores de referencia de coste medio anual de correctivos (M5) 133
Figura 46. Valores de referencia de número de correctivos en último cuartil (M6) 133
Figura 47. Valores de referencia de coste medio de correctivos en último cuartil (M7) 134
Figura 48. Valores de referencia de coste total de correctivos/coste total contratos (M8) 134
Figura 49. Valores de referencia de nº correctivos anuales equipos con preventivos (M9) 135
Figura 50. Valores de referencia de coste contrato anual/ nº revisiones preventivas (M10) 135
Figura 51. Valores de referencia de tiempo máximo de solución de un correctivo (M11) 136
Figura 52. Valores de referencia de tiempo medio de atención de una incidencia (M12) 136
Figura 53. Valores de referencia de tiempo medio de reparación por incidencia (M13) 137
Figura 54. Valores de referencia de tiempo medio de solución por incidencia (M14) 137
Figura 55. Valores de referencia de indisponibilidad anual (M15) 138
Figura 56. Valores de referencia de coste anual contrato/ valor compra equipo (M16) 138
Figura 57. Valores de referencia de coste total correctivos/valor compra equipo (M17) 139
Figura 58. Valores de referencia de coste anual contrato/ valor compra equipo (M18) 139
Figura 59. Valores de referencia de coste total mantenimiento/ valor compra equipo (M19) 140
Figura 60. Valores de referencia de coste de la indisponibilidad (M20) 140
Figura 61. Comparación de indicadores de la familia de electromedicina 164
Figura 62. Comparación de indicadores de la familia de diagnóstico por imagen 165
Figura 63. Indicador de obsolescencia según tipología 166
Figura 64. Indicador de nivel de servicio según tipología 167
Figura 65. Indicador de alcance de contrato según tipología 168

Figura 66. Indicador del nivel de incidencias correctivas según tipología 169
Figura 67. Indicador de valoración global del mantenimiento según tipología 170
Figura 68. Indicadores de monitorización, respiración, neonatología y oftalmología 171
Figura 69. Indicadores de cirugía, endoscopia flexible y rígida y esterilización 172
Figura 70. Indicadores de odontología, rehabilitación, neurología, diálisis 173
Figura 71. Indicadores de digitalización, ultrasonidos, convencional y alta tecnología 174
Figura 72. Indicador de obsolescencia según departamento 176
Figura 73. Indicador de nivel de servicio según departamento 177
Figura 74. Indicador de alcance de contrato según departamento 178
Figura 75. Indicador de nivel de incidencias según departamento 179
Figura 76. Indicador de valoración global del mantenimiento según departamento 180
Figura 77. Indicadores de DIM, oncología, uci de adultos y hospitalización 181
Figura 78. Indicadores de UCI pediátrica, hospitalización, reproducción y quirófano 182
Figura 79. Indicadores de consultas, urgencias, endoscopias y rehabilitación 183
Figura 80. Indicadores de laboratorio, hemodinámica y diálisis 184
Figura 81. Indicador de obsolescencia según subtipo 186
Figura 82. Indicador de nivel de servicio según subtipo 187
Figura 83. Indicador de alcance de contrato según subtipo 188
Figura 84. Indicador de nivel de incidencias correctivas según subtipo 189
Figura 85. Indicador de valoración global del mantenimiento según subtipo 190
Figura 86. Ordenación subtipos de electromedicina: obsolescencia 191
Figura 87. Ordenación de subtipos de electromedicina: nivel de servicio 192
Figura 88. Ordenación de subtipos de electromedicina: alcance de contrato 192
Figura 89. Ordenación de subtipos de electromedicina: nivel de incidencias correctivas 193
Figura 90. Ordenación de subtipos de electromedicina: valoración global mantenimiento 193

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de los hospitales 29
Tabla 2. Descripción de bases de datos 30
Tabla 3. Campos de la base de datos de inventario 32
Tabla 4. Campos de la base de datos de correctivos 33
Tabla 5. Campos de la base de datos de contratos 34
Tabla 6. Información de infraestructura hospitalaria 36
Tabla 7. Partidas presupuestarias 37
Tabla 8. Descripción de las variables utilizadas en el estudio 38
Tabla 9. Subprocesos del Servicio de Diagnóstico por Imagen 64
Tabla 10. Equipamiento Servicio de Diagnóstico por Imagen de HM Montepríncipe 66
Tabla 11. Definición del *Takt Time* 67
Tabla 12. Cálculo del *Takt Time* 69
Tabla 13. Análisis de ineficiencias 72
Tabla 14. Puntuaciones de las ineficiencias para la matriz IA 75
Tabla 15. Soluciones propuestas a las ineficiencias 77
Tabla 16. Análisis cuantitativo de las soluciones 81
Tabla 17. Cálculo del nuevo *Takt Time* 81
Tabla 18. Ficha de gestión del proyecto de solución S1 86
Tabla 19. Ficha de gestión del proyecto de solución S2 87
Tabla 20. Ficha de gestión del proyecto de solución S3 88
Tabla 21. Ficha de gestión del proyecto de solución S4 89
Tabla 22. Ficha de gestión del proyecto de solución S5 90
Tabla 23. Clasificación de las variables independientes del modelo 91
Tabla 24. Coeficientes de determinación (R^2) 92
Tabla 25. Estadísticas de la regresión multivariable 109
Tabla 26. Indicadores de coste de mantenimiento 112
Tabla 27. Indicadores de número de incidencias 113
Tabla 28. Ratios entre el número de pacientes y recursos 113
Tabla 29. Resumen de valores de referencia de tramos para la métrica M1-M10 141
Tabla 30. Resumen de valores de referencia de tramos para la métrica M11-M20 141
Tabla 31. Parámetros de cada métrica e indicador 143
Tabla 32. Parámetros de cada tramo e indicador 143
Tabla 33. Valores del indicador de obsolescencia (IND1) según métrica y tramo 143
Tabla 34. Valores del indicador de nivel de servicio (IND2) según métrica y tramo 143
Tabla 35. Valores del indicador de alcance del contrato (IND3) según métrica y tramo 143
Tabla 36. Valores del indicador de incidencias correctivas (IND4) según métrica y tramo 143
Tabla 37. Valores del indicador de valoración global manten. (IND4) según métrica y tramo 144

Tabla 38. Descripción del indicador obsolescencia 144
Tabla 39. Descripción del indicador nivel de servicio 144
Tabla 40. Descripción del indicador alcance de contrato 144
Tabla 41. Descripción del indicador incidencias correctivas 145
Tabla 42. Descripción del indicador valoración global mantenimiento 145
Tabla 43. Métricas (M1-M7) según familia 146
Tabla 44. Métricas (M8-M15) según familia 148
Tabla 45. Métricas (M16-M20) según familia 150
Tabla 46. Métricas (M1-M7) según tipología 151
Tabla 47. Métricas (M8-M15) según tipología 153
Tabla 48. Métricas (M1-M7) según tipología 155
Tabla 49. Métricas (M1-M7) según departamento 157
Tabla 50. Métricas (M8-M15) según departamento 160
Tabla 51. Métricas (M16-M20) según departamento 162
Tabla 52. Indicadores según familia 164
Tabla 53. Indicadores según tipología 165
Tabla 54. Indicadores según departamento 175
Tabla 55. Indicadores según subtipo 185
Tabla 56. Indicadores de resonancia magnética 194
Tabla 57. Indicadores de telemando 195

1. INTRODUCCIÓN

1.1 La Ingeniería en los hospitales

Los hospitales de hoy en día son organizaciones complejas altamente tecnificadas, con gran dependencia de los suministros energéticos, equipamiento e instalaciones específicas [1]. En el imaginario de la sociedad, un hospital es un centro con especialistas en salud, cuyos máximos representantes son los médicos y el personal de enfermería, los cuales desarrollan su trabajo en un escenario estático, estable, robusto y libre de incidencias no médicas. Si se profundiza algo más, se pueden incorporar otros perfiles como auxiliares de enfermería, celadores, técnicos de radiodiagnóstico, de laboratorio, de farmacia, limpieza, etc. [2].

Sin embargo, la aparente estabilidad técnica y funcional del equipamiento depende de un área poco conocida fuera de este entorno asistencial, denominada Ingeniería Hospitalaria y que es la que garantiza la operatividad del sistema tanto en el corto como en el largo plazo. Este desconocimiento probablemente se deba a que en la mayoría de los casos su presencia no es visible de forma directa, sino que se encuentra en un segundo plano, velando por la seguridad de las personas, integridad y fiabilidad de los equipos y funcionalidad de todo el conjunto de forma latente [3].

Desde el punto de vista clásico, la Ingeniería Hospitalaria ha estado basada en el mantenimiento de las instalaciones y del equipamiento electromédico, a través de personal propio o de medios externos [4]. Esta actuación garantiza el funcionamiento de las instalaciones hospitalarias en el corto plazo.

El mantenimiento en un hospital tiene como objetivo principal garantizar la funcionalidad de las infraestructuras, instalaciones y equipos necesarios para el desarrollo correcto de los procesos asistenciales, por lo que resulta esencial para la mayoría de actividades hospitalarias [5]. Puede ser planificado si su actuación es preventiva o inmediata si se realiza porque el equipo ha perdido su operatividad. Según la complejidad de las tareas, costes o disponibilidad requerida, el servicio puede prestarse con recursos propios, externos o de forma mixta [6]-[7].

Las instalaciones más habituales sobre las que actúa el mantenimiento son electricidad, climatización, renovación de aire, gases medicinales, centrales de generación de vacío, fontanería, saneamiento, red de aire comprimido, gas (suministro energético), telefonía, televisión, cámaras de seguridad, barreras y accesos, protección contra incendios, chimeneas/ extracciones, depósitos de agua de incendios y de consumo humano. Las instalaciones eléctricas se clasifican en dos niveles: acometida de red e instalaciones de garantía de suministro como grupos electrógenos y sistemas de alimentación ininterrumpida [8]. La climatización es la encargada de mantener un entorno adecuado para el desarrollo de los diferentes procesos a través de las unidades de tratamiento de aire, permitiendo ambientes limpios y sobrepresionados en quirófanos y UCIs y con la temperatura requerida a través de los equipos de producción de frío y calor [9]. La instalación de gases medicinales permite el almacenaje, distribución y suministro de oxígeno, aire medicinal, protóxido o dióxido de carbono a zonas específicas del hospital.

De forma particular hay que mencionar el mantenimiento del equipamiento electromédico: equipos de electromedicina, diagnóstico por imagen, medicina nuclear, radioterapia, etc. los cuales permiten el desempeño adecuado de los procesos asistenciales [10].

Sin embargo, la Ingeniería Hospitalaria, entendida de forma amplia, es una función estratégica que actúa de forma transversal a todos los departamentos y que tiene un gran impacto en todos los niveles organizativos y de operación del sistema [11]. La ingeniería del hospital tiene un alto impacto en diferentes áreas asistenciales como las consultas, diagnóstico por imagen, laboratorio, farmacia, urgencias, quirófanos, UCIs o plantas de hospitalización [12].

La Ingeniería Hospitalaria comienza su actuación en las primeras fases del diseño de un nuevo hospital. Para que un centro sanitario pueda realizar las funciones para las que ha sido diseñado requiere de un importante soporte técnico y de definición de infraestructuras. El entorno hospitalario es complejo y sus procesos se encuentran altamente interrelacionados [13]. La ingeniería de procesos permite la optimización y funcionamiento eficiente de todo el sistema, mejorando la circulación de personas, pacientes y materiales, reduciendo tiempos de espera, controlando stocks o asegurando el flujo continuo de los *inputs* [14].

A través de la actuación continua de la función de Ingeniería Hospitalaria se garantiza la sostenibilidad del hospital a largo plazo, además de la optimización del consumo eléctrico y de gas, reduciendo costes y huella de carbono y contribuyendo a la gestión medioambiental del centro [15].

1.1.1 Optimización del proceso hospitalario

El sistema hospitalario se compone de múltiples procesos interrelacionados [16]. Estos procedimientos establecen la forma en la que se realizan determinadas acciones para conseguir el resultado previsto. Esta forma de organización de tareas siempre existe independientemente de que esté documentada o que incluso sean conscientes de ella las personas que la realizan [17].

Muchos de los procedimientos hospitalarios, tanto los asistenciales: urgencias, cirugía u hospitalización como los de apoyo: mantenimiento, servicios generales o seguridad acaban acumulando ineficiencias debido a pequeños cambios en las formas de trabajo, en el entorno o en la interacción con otras tareas que los alejan del diseño original. Esta situación se produce sobre todo en los procesos cuyo resultado depende del recurso humano principalmente [18]. La falta de homogeneidad casi siempre lleva asociado unos mayores costes, además del riesgo de no conseguir los resultados esperados, que particularizado en el entorno hospitalario y en los pacientes que tratan, puede tener graves implicaciones para su salud. La solución más habitual para este problema es la estandarización de las actividades [19], que en el caso asistencial tiene como dificultad la gran cantidad de factores influyen.

La normalización de las acciones en el diseño inicial, en general no es suficiente para mantener el resultado previsto a lo largo del tiempo, por lo que es necesario establecer elementos de control [20]. Un proceso se dice que está controlado si el resultado obtenido coincide con el esperado o se encuentra dentro de los márgenes de tolerancia de diseño [21]. Es importante señalar que la estandarización no garantiza la excelencia, sino que asegura la uniformidad del resultado o la de los pasos intermedios del proceso [22]. La verificación puede realizarse con simples mecanismos informales, o bien con otros más reglados como por ejemplo un sistema de gestión de la calidad [23].

Según Mintzberg (1989), los hospitales se consideran organizaciones burocráticas profesionales, en las que la gestión y toma de decisiones son realizadas por los profesionales sanitarios de forma descentralizada [24]-[25]. Muchas de las decisiones tomadas en el entorno hospitalario anteponen la orientación al paciente a la efectividad y coste del proceso [26].

Sin embargo, también existen otras actividades hospitalarias que dependen fundamentalmente del uso de equipamiento para cumplir con su función y la intervención del profesional sanitario tiene menos impacto, como son los servicios de diagnóstico por imagen o de análisis clínicos [27]. En estos casos, es posible aplicar distintas metodologías de origen industrial para su optimización. Mintzberg (1989) considera estos procedimientos como burocráticos maquinales, es decir, el control del proceso se encuentra fundamentalmente incorporado en la propia tecnología y en la organización. La proporción entre estos dos tipos de procesos

ha evolucionado en el tiempo, dando lugar a formas de trabajo cada vez más tecnificadas y con menos intervención humana. El caso más representativo en el sector sanitario es la digitalización de los procesos e incorporación de nuevas tecnologías [28].

En cualquier caso, ya sea una burocracia profesional o maquinal, los mecanismos de control tienden a ser estáticos, es decir, una vez establecidos, no suelen revisarse o solo se hace cuando el resultado es claramente erróneo. El uso y la costumbre hacen que se pierda la perspectiva sobre la efectividad real del procedimiento, resultando complicado para las personas que lo realizan tomar conciencia de si el resultado es válido.

Existen distintas herramientas para asegurar que los procesos sean revisados. Los sistemas de gestión de la calidad han demostrado su efectividad en la mejora de la satisfacción de paciente, documentación de actividades y la mejora continua del sistema [29], ya que incorporan mecanismos de control de los procedimientos de trabajo a través de auditorías internas y externas. La principal carencia que presentan estos sistemas es que no cuentan con herramientas específicas para la mejora y el seguimiento del proceso, sino que se centran en la estandarización de los resultados a través de protocolos documentados que aseguran que el flujo de tareas se realiza de forma estable y dentro de los márgenes de tolerancia para los que han sido diseñados.

Aunque existe una gran diferencia entre las actividades no documentadas y las que sí lo están, una vez realizado el diseño de la operativa se corre el riesgo de que los procedimientos no sean revisados y acaben desviados de los objetivos iniciales. Por tanto, es habitual que los procesos acaben acumulando ineficiencias, que se traducen en actividades que no solo no añaden valor, sino que restan al conjunto la posibilidad de usar esos recursos en otras áreas que los necesiten [30]. Además, por el hecho de formar parte de un sistema interrelacionado, acaban teniendo un efecto multiplicador en el conjunto, que va más allá de la suma de los errores individuales. Las desviaciones se traducen en sobrecostes o desperdicio de recursos, lo que implica un mayor coste total, una pérdida del nivel de servicio y en determinados casos, pérdida de funcionalidad parcial o total [31].

La ingeniería ofrece distintas herramientas y metodologías para la optimización de procesos y para la toma de decisiones denominados de forma genérica investigación de operaciones. Son técnicas habituales en esta rama procesos de decisión de las cadenas de Markov, Método de Cox, simulaciones, teoría de colas, métodos de optimización, análisis envolvente de datos, redes neuronales o análisis de decisiones [32]. Todas estas herramientas tienen en común la existencia de un modelo matemático que describe el sistema [33].

Estas técnicas tienen una gran utilidad en todo tipo de entornos industriales. Sin embargo, pueden no resultar adecuadas para las actividades hospitalarias, por

la dificultad de obtención de datos y la modelización matemática del proceso, que a su vez requiere de personal experto para su diseño, análisis e implementación [34].

Se han encontrado diferentes artículos que plantean la optimización de procesos desde el punto de vista del diseño e implantación de sistemas de gestión de la calidad. Por ejemplo, Jaap van den Heuvel *et al.* (2005) describen cómo se diseñó e implantó un sistema de gestión de la calidad basado en la familia de normas ISO 9000 en un hospital de la Cruz Roja en Beverwijk (Holanda) [35]. La metodología aplicada consistió en establecer una gestión por procesos de las actividades que se habían realizado previamente por departamentos. Se puso el foco en el paciente y se mejoró el registro de información, para poder aplicar acciones de mejora. Sin embargo, no se tiene constancia de cómo evolucionaron los procesos y si se mantuvo la ventaja inicial. De hecho, plantean en el estudio si la documentación de los procedimientos es mera burocracia o es realmente un sistema optimizado, transmitiendo ciertas dudas sobre su efectividad.

Corbett *et al.* (2005) relacionaron el impacto financiero en diferentes hospitales de Estados Unidos tras haber implantado un sistema de gestión de la calidad [36]. Zhu (1999) comparó las ventajas y desventajas de implantar un sistema de calidad basado en Total Quality Management (TQM) o en ISO 9000 [37]. Sin embargo, estos estudios parten de centros cuya documentación no estaba protocolizada de forma sistemática antes de la implantación del sistema, por lo que obtienen claramente una serie de ventajas, pero no se analizan las ineficiencias individuales de los procesos, sino que se pone el foco en la mejora del sistema.

En otros documentos se hace referencia a métodos de optimización basados en modelos matemáticos aplicados a procesos particulares. Nickel y Schmidt (2009) aplicaron un modelo de simulación multicriterio de eventos discretos para analizar el flujo de pacientes en un servicio de diagnóstico por imagen en un hospital universitario de Alemania. Consiguieron demostrar que los pacientes acumulaban largos tiempos de espera, así como periodos ociosos de los equipos y plantearon soluciones organizativas para optimizar el funcionamiento del servicio, aunque no mencionan la incorporación del recurso humano del proceso como parte de la solución [38].

Bhattacharjee *et al.* (2014) plantearon la mejora de los procesos del hospital a través de la modelización del circuito de los pacientes [39]. Elliott N. Weiss *et al.* (1970) realizó la misma aproximación basado en modelos de Markov [40]. Broyles *et al.* (2010) propusieron un sistema de control de inventarios hospitalarios basados en cadenas de Markov [41]. En estos casos la principal limitación es el uso de modelos matemáticos que deben ser diseñados por personas expertas, lo cual limita su aplicación de forma autónoma.

Para poder solucionar en parte las limitaciones identificadas en los estudios mencionados anteriormente, se plantea una metodología de optimización de procesos, que si bien nace de la industria y de la ingeniería tiene un encaje muy adecuado en el entorno hospitalario y sus procesos. Esta metodología se denomina *Lean*, *Lean Manufacturing*, *Lean Management* o de forma particular *Lean Healthcare* [42]. La metodología *Lean* tiene su origen en lo que se denomina como TPS o *Toyota Production System*, el cual es un sistema de producción con un objetivo perfectamente definido: la completa eliminación de todos los desperdicios del sistema [43].

Lean se asienta en tres pilares de aplicación a cualquier organización [44]: *Just in Time*, que consiste en hacer sólo lo que se necesita, cuando se necesita y en la cantidad necesaria. *Jikoda*, con el que se asegura el flujo continuo de producción, a través de la secuencia adecuada de las tareas del proceso, así como la capacitación de las personas que lo manejan. *Kaizen* que se basa en la idea de que todo es mejorable, incorporando así el concepto de mejora continua.

Algunos de los detractores del uso de *Lean* en organizaciones de prestación de servicios argumentan que su origen industrial no permite un adecuado encaje en entornos no fabriles [45]. Sin embargo, cuando se profundiza en la filosofía que sostiene esta metodología se comprueba que tiene una aplicación directa en la optimización de procesos en los que las personas tienen un rol relevante [46].

La aplicación de *Lean Healthcare* en la optimización de los procesos hospitalarios se basa en diversas técnicas como: el análisis de la cadena de flujo de valor o también denominada en su propia terminología *Value Stream Mapping* (VSM), control visual del proceso, *espagueti chart* o la metodología de las 5S [47]. Todas estas técnicas son de fácil explicación, aplicación y seguimiento, ya que no existen complicados modelos matemáticos que las sustenten, sino que lo que hay detrás es casi una aplicación ordenada de principios de sentido común.

No debe confundirse la simplicidad aparente de las técnicas con la efectividad de sus resultados. El éxito en la aplicación de *Lean* se apoya en las personas que lo realizan y es necesaria la implicación de las personas que forman parte del proceso, así como el apoyo de la Dirección. Una vez se han interiorizado determinadas actitudes y aprendizaje, el procedimiento queda controlado a través de la mejora continua.

Actualmente existen multitud de documentos que muestran cómo aplicar *Lean* en diferentes sectores, incluido el hospitalario. Por tanto, es una metodología consolidada desde hace muchos años con numerosos casos de éxito, por lo que no se puede hablar de herramientas innovadoras sino de proyectos exitosos.

Aherne (2010) analizó una colección de casos de estudio de aplicación de *Lean Healthcare*, que van desde el proceso de cirugía vascular, gestión de almacenaje de material, laboratorio o admisión del paciente, aunque no incluyó ningún caso

de aplicación a un servicio de diagnóstico por imagen [48]. Jonathan B. Kruskal *et al.* (2012) realizaron un proyecto *Lean* para la mejora del desempeño y eficiencia de un departamento de radiología pero no detallaron los subprocesos de uso de máquinas de forma individual [49].

Por otro lado, Karstoft (2011) planteó si era posible la implantación de un sistema *Lean* en un servicio de radiología, analizando el departamento de forma general y realizando un caso de estudio para una máquina de Tomografía Axial Computerizada (TAC), pero no identificó las herramientas utilizadas [50]. Costa *et al.* (2016) realizan una revisión, clasificación y análisis de la literatura de *Lean Healthcare* a través de 107 artículos. Es una revisión del estado del arte basada en la clasificación de los artículos por país, área hospitalaria o herramientas usadas, de forma que pueda ayudar al desarrollo de proyectos similares basados en otros casos de éxito. Una de sus conclusiones es que existen pocos estudios que detallen el proceso de implantación y las herramientas usadas, así como la barreras y factores críticos encontrados [51].

1.1.2 Relación del mantenimiento con otros procesos hospitalarios

Los hospitales de hoy en día tienen una fuerte dependencia de la tecnología, ya que requieren de multitud de dispositivos electromédicos basados en distintos principios físicos de funcionamiento: calor, electricidad, magnetismo, radiación, microondas, etc. [52]. Estos equipos se pueden clasificar como invasivos, soporte vital, diagnóstico, etc. lo cual permite segmentarlos y tratar cada tipo de forma particular [53]. Sin embargo, a pesar de las diferencias existentes entre ellos, tienen muchos objetivos compartidos: seguridad del paciente y del usuario, mantenimiento, vigilancia de la obsolescencia, robustez y adecuación al uso hospitalario [54], cumplimiento de estándares [55] y de la normativa vigente [56].

La importancia de la función de mantenimiento en los hospitales es bien conocida por sus gestores, más allá de los responsables directos del servicio [57]. Sin embargo, se considera como un departamento estanco que no se mezcla o está relacionado con otros recursos o procesos, tanto asistenciales o de apoyo. Basta con profundizar en el alcance transversal que caracteriza al mantenimiento en un hospital para tomar conciencia de su interrelación con otros procesos.

Es de esa idea de dónde surge la posibilidad de investigar si a través de determinadas variables, de fácil adquisición, es posible estimar los costes y nivel de servicio del mantenimiento [58]. De hecho, contar con una estimación de esta información en determinados momentos tiene una gran relevancia para los gerentes y decisores del sistema hospitalario, ya que los costes de mantenimiento en centros altamente tecnificados suelen tener un peso relevante [59]. Por ejemplo, el coste del mantenimiento anual de los equipos de electromedicina de un hospital se estima en más del 5% del valor de adquisición de los equipos, llegando en algunos casos de dispositivos de alta tecnología hasta el 12% [60].

Cualquier mejora en los costes operativos tiene un impacto directo en el EBITDA, lo que implica que esos recursos financieros son liberados para su uso en otras áreas o quedan simplemente como un ahorro [61]. Por lo tanto, la gestión de un hospital está directamente condicionada por su sostenibilidad económica y medioambiental a largo plazo [62].

Existen multitud de estudios que analizan elementos, procesos y funcionamiento del mantenimiento de equipos electromédicos [63]. Se han encontrado artículos que se centran en el mantenimiento del equipamiento de departamentos concretos, como el que describe Mendes *et al.* (2019) en relación a los aspectos relevantes sobre las intervenciones basadas en auditorías de quirófanos y salas de recuperación, como actividades estratégicas en el ámbito del mantenimiento hospitalario [64].

Igualmente Özdemirci *et al.* (2014) estudiaron los analizadores de incubadoras infantiles en un hospital de Turquía, evaluando las deficiencias surgidas teniendo en cuenta las normas y los estudios de metrología clínica [65]. Daneri (2007) analizó desde un punto de vista técnico el funcionamiento de algunos equipos de unidades de cuidados intensivos [66]. Por otro lado, Herrera-Galán *et al.* (2018) evaluaron el plan de mantenimiento de los equipos electromédicos de un hospital pediátrico en la Región Sureste de Jamaica, proponiendo un procedimiento para controlar de forma eficiente la gestión del servicio de mantenimiento [67]. Badilla-Murillo (2020) realizó un estudio de una sala de angiografía a través de una simulación de eventos discretos [68].

Los anteriores estudios resultan muy específicos en la tipología analizada, ya que ninguno de estos autores evaluó la eficiencia y sostenibilidad del mantenimiento electromédico desde el punto de vista de los costes, sino que se centraron en los aspectos técnicos de servicio.

Otros estudios abordan la mejora de la gestión del mantenimiento a través de herramientas informáticas y de simulación. Por ejemplo, Picazo (2011) analizó la mejora del servicio de mantenimiento mediante la aplicación de la metodología RCM (Reliability Centered Maintenance) a un conjunto de equipos críticos [69]. Santana *et al.* (2018) desarrollaron un método de simulación de eventos discretos para la aplicación en un angiógrafo [70]. Ambos autores se centraron en la fiabilidad de los equipos, sin relacionarlos con el resto del entorno hospitalario.

Escobar *et al.* (2015) presentaron una herramienta informática de simulación aplicada al mantenimiento preventivo de equipos electromédicos, pero no analizaron los costes operativos y limitaron su alcance a pocas familias [71].

Si bien estas aportaciones basadas en el desarrollo de modelos matemáticos implementados a través de *software* específico permiten mejorar la eficiencia de determinados procesos, no resultan extrapolables a otros entornos que podrían tener similares características, ya que presentan condiciones muy específicas.

En otros casos se plantean estudios que se acercan más al planteamiento de esta Tesis Doctoral, dando herramientas a los gestores que permitan tomar decisiones de tipo estratégico en relación con la gestión del mantenimiento. Esta visión va más allá de la operativa y la mejora de la eficiencia de los procesos particulares que se han descrito en los estudios de los párrafos anteriores, ya que incorporan indicadores, costes y riesgos, que son elementos de análisis de la eficiencia en el largo plazo. Mahfoud *et al.* (2017) analizaron la relación entre diferentes variables de mantenimiento, tales como el tipo de estrategia de gestión del servicio, criterios de fiabilidad, costes de mantenimiento y riesgos, en un centro sanitario de Marruecos con el objetivo de optimizar y mejorar el servicio de mantenimiento desde el punto de vista de la gestión y la operativa [72].

Gonnelli *et al.* (2018) crearon un conjunto de Key Performance Indicators (KPI) de tipo técnico, financiero y organizativo para evaluar el mantenimiento de 13 tipos de equipos electromédicos. Los resultados se limitan a un solo hospital de gran tamaño (1367 camas) y no permiten la extrapolación a otros de distinta dimensión [73]. García-Sanz-Calcedo *et al.* (2018) propusieron distintos indicadores de eficiencia aplicables a hospitales del sector público en Alemania y de ahorro en energía eléctrica, si bien en estos casos no tuvieron en cuenta los parámetros propios del servicio de mantenimiento por lo que no se puede relacionar con otras áreas [74]-[75]. Antonio Macías García *et al.* (2019) planteó un estudio de absorción de paracetamol en las aguas residuales de un hospital a través del uso de filtros de carbón activado, pero no se relacionó con el resto de instalaciones [76].

La limitación de estas investigaciones que abordan la gestión del mantenimiento desde un punto de vista estratégico es que no lo relacionan con otras áreas, por lo que ahondan en el propio departamento, pero no permite tomar decisiones en otros niveles gerenciales o que tengan en cuenta la parte asistencial.

En otros abordajes se utiliza como herramienta de estudio la realización de encuestas. Esta metodología cuenta con la importante ventaja de obtener un *feedback* directo de las personas que realizan o están relacionadas con el servicio de mantenimiento. Umbelino *et al.* (2019) realizaron una encuesta sobre algunos los estándares que se aplican al mantenimiento de hospitales para garantizar el cumplimiento de las especificaciones de operación en Portugal [77]. Coelho (2017) describió los procedimientos técnicos de mantenimiento preventivo y correctivo de varias familias de equipos electromédicos en otro hospital de Portugal, desde el punto de vista de una empresa mantenedora externa, por lo que se limita en gran medida la integración de la información de este servicio con las otras áreas asistenciales [78].

Murillo y Mancera (2013) realizaron una encuesta a responsables de mantenimiento en once entidades prestadoras de servicios de salud de Medellín (Colombia) y hallaron que la causa de fallo más común en los equipos

electromédicos del servicio de urgencia era el mal manejo de los equipos (75%) por parte de los usuarios [79].

Orozco *et al.* (2015) realizaron una encuesta sobre la gestión de mantenimiento de los equipos biomédicos más complejos utilizados en urgencias, demostrando que un adecuado mantenimiento asegura elevado porcentaje éxito [80]. Sin embargo, Mwanza and Mbohwa, (2015) evaluaron la efectividad de las prácticas de mantenimiento utilizadas en equipos en tres hospitales públicos de Sudáfrica mediante 55 cuestionarios entre los operadores y otros trabajadores y sus resultados mostraron una alta tasa de indisponibilidad de los equipos, atribuida a los sistemas de programación y las altas averías de los equipos [81].

En general se han encontrado investigaciones o encuestas centradas en muestras muy pequeñas, con baja significancia estadística y elevado sesgo. Suelen estar referidas a pocas familias de equipos diferentes por lo que los resultados no pueden extrapolarse a servicios mantenimiento generales.

La información de mantenimiento a veces resulta complicada de obtener a pesar de que se almacenan grandes cantidades de datos técnicos y de intervención. La explotación suele ser compleja y en muchos casos los informes obtenidos no son comparables entre distintos centros, ya que se diseñan para dar respuestas a necesidades muy concretas.

La posibilidad de acceder a datos básicos de mantenimiento como los costes o el número de averías de una forma rápida y partiendo de otras variables de fácil obtención de otras áreas permitiría a los gestores del hospital tomar decisiones de tipo estratégico relacionadas con el mantenimiento o con otros servicios, tales como priorizar inversiones de instalaciones, plantear planes de renovación de equipamiento o valorar la rentabilidad de determinados servicios asistenciales. El segundo perfil beneficiado de esta información serían los responsables del diseño hospitalario, ya que permite manejar una aproximación de los costes mantenimiento basado en parámetros básicos.

1.1.3 Uso estratégico de la información de mantenimiento

Los hospitales requieren de numerosos equipos electromédicos para realizar sus funciones de apoyo asistencial [82]. Existe una tipología muy variada, pero todos tienen en común la necesidad de acciones de mantenimiento, con el fin de cumplir con requisitos legales, proporcionar seguridad al paciente y al usuario, mantener la disponibilidad de los equipos y evitar otros costes de reparación y/o lucros cesantes. Un mantenimiento adecuado debe asegurar el nivel de servicio prestablecido con una alta fiabilidad y unos costes razonables [83]. Es una función crítica que interactúa con muchas partes del sistema y que tiene un coste importante por lo que se puede considerar como un proceso estratégico [84]. Sin embargo, esto no siempre es así, ya que tradicionalmente se ha tratado a este servicio como un departamento aislado del resto [85].

Dado que muchos equipos requieren de algún tipo de intervención o reparación a lo largo de su vida útil, el servicio de mantenimiento es el encargado de realizar las actuaciones necesarias para mantener o restaurar la funcionalidad original del equipo en el menor tiempo posible, además de proporcionar seguridad y confort a los usuarios [86]-[87]. Esta garantía debe estar presente durante todo el ciclo de vida, desde su adquisición, instalación y puesta en marcha, hasta su destrucción [88] y gestión como residuo [89].

El mantenimiento de los equipos requiere dos tipos de actuaciones complementarias: acciones preventivas y correctivas. El equilibrio entre ambas permite conseguir una disponibilidad aceptable y coste controlado, ya que las intervenciones preventivas se realizan sin haberse producido la avería y deben verse compensadas por menos intervenciones imprevistas y menos costosas [90]-[91].

Es habitual que el mantenimiento tenga un enfoque a corto o medio plazo, ya que se centra en la duración del contrato o en periodos presupuestarios anuales [92]. El objetivo implícito es mantener la funcionalidad de los equipos en el periodo de referencia y no en toda la vida útil. Basta con extender el alcance a un horizonte temporal largo para que aparezcan conexiones con otros procesos como la compra de equipamiento, vigilancia de la obsolescencia, reducción de costes o aumento de la calidad de servicio técnico y asistencial. Por lo tanto, para que el mantenimiento pueda ser considerado como una función estratégica es necesario identificar sus variables relevantes, transformarlas si fuera necesario y conectarlas con otras áreas de la organización [93].

Una de las ventajas que tiene el mantenimiento del equipamiento electromédico es que genera gran cantidad de datos que habitualmente son registrados y almacenados por distintos medios [94]. A finales del siglo XX era normal generar partes y albaranes en papel, cuyo almacenamiento consistía en archivarlos durante una serie de años. De la mano de los avances informáticos empezaron a aparecer *software* específicos denominados de Gestión del Mantenimiento Asistido por Ordenador (GMAO) que facilitaron en gran medida el registro, almacenamiento y consulta de los partes de trabajo [95].

Pero el registro de la información en un sistema GMAO no supone de forma automática que esta sea analizada o que pueda ser tratada o conectada con otros departamentos. De hecho, es habitual que acaben convirtiéndose en grandes bases de datos que no tienen más uso que el cumplimiento legal de mantener un registro de las intervenciones realizadas en los equipos y la tranquilidad de los responsables de poder realizar consultas puntuales. Además, suelen emplearse gran cantidad de horas de personal administrativo o técnico para alimentar de datos la aplicación, con el consiguiente aumento de costes o infrautilización del personal técnico realizando tareas administrativas [96]. La explotación de la base de datos del GMAO necesita que se cumplan unos requisitos en el *software*:

- Organización de la información y exportación: Como mínimo debe obtenerse una matriz de datos que pueda ser procesada en una hoja de cálculo o que sirva de entrada a otras aplicaciones. No siempre se pueden realizar exportaciones en *software* comerciales, o bien porque no está previsto o porque es una forma de protección de la marca. Otras veces se realizan exportaciones parciales con algunos campos predeterminados.
- Herramientas para informes: Los GMAO suelen tener herramientas propias para la realización de informes. Sin embargo, no suelen tener la flexibilidad para realizar cambios más allá de lo que ha sido programado, por lo que acaba convirtiéndose en una herramienta estática. Otra de las restricciones es que se encuentran limitados a la propia información del sistema, por lo que no es posible realizar análisis conjuntos con otras bases de datos o aplicaciones. El *software* debe tener la suficiente flexibilidad para contestar a la mayoría de las cuestiones que se puedan plantear respecto de la información que contienen.
- Interfaz de comunicación con otras aplicaciones: Debe existir la posibilidad de interconectar las bases de datos y generar informes con información cruzada.

La explotación de la información contenida en esta base de datos tiene aplicación directa para los responsables de la gestión del mantenimiento, aunque también hay otros gestores de otras áreas que se pueden beneficiar como direcciones asistenciales, operativas, compras, control financiero, etc.

Se han encontrado numerosos estudios que describen los beneficios del uso de estas aplicaciones informáticas en cualquier sector industrial y en particular en los hospitales. Kullolli (2008) realizó una guía sobre cómo seleccionar un GMAO adaptado a las necesidades particulares de un hospital. Se limita a dar algunas indicaciones sin profundizar en las particularidades de los centros sanitarios o las conexiones con otros departamentos [97]. Azra y Dachyar (2020) van un paso más allá de la clásica aplicación de mantenimiento y plantean una mejora del *software* a través de uso de sensores y de dispositivos de identificación de radiofrecuencia (RFID) para el mantenimiento de los equipos de un departamento de radiología incluyendo el uso de *Internet of Thing*s (IoT) para resolver cuestiones operativas [98].

Por otro lado, Labib (2004) propone dotar al GMAO de un modelo de ayuda a la toma de decisiones para establecer la política de mantenimiento más adecuada para cada equipo [99]. Sin embargo, este modelo está restringido a equipos que se encuentran monitorizados a través de sensores, lo cual hace que sea difícil la extrapolación a la mayoría del equipamiento electromédico instalado en un hospital.

Sin embargo, los estudios anteriores únicamente dan respuesta a la capa operativa, es decir, no ayudan a la toma de decisiones estratégicas del propio servicio ni de otros departamentos.

1.2 Enfoque de sistemas en el entorno hospitalario

Un hospital se puede analizar como un conjunto de procesos interrelacionados en los que existe un elemento de entrada o *input* y un elemento de salida u *output*. La transformación de las entradas en salidas es realizada por los recursos humanos y otros recursos materiales como el propio edificio, las instalaciones generales y específicas, el equipamiento y todo el material que se consume durante el proceso o que es añadido al *input*.

Usar la terminología de sistemas en el entorno hospitalario puede ser controvertido, ya que hablar de un paciente como un elemento de una cadena de producción puede resultar chocante o producir cierto rechazo. Sin embargo, el análisis de un hospital como un entorno industrial permite aplicar muchas técnicas, herramientas y estrategias contrastadas en otros sectores [100]-[101].

En la figura 1 se representan los diferentes elementos de un sistema: entradas (*input*), salidas (*output*), procesos de transformación internos o externos y sus interacciones y recursos (humanos, arquitectura, instalaciones, equipamiento, material fungible, suministros energéticos). El enfoque de sistemas analiza las partes que lo componen, sus interacciones y el resultado final.

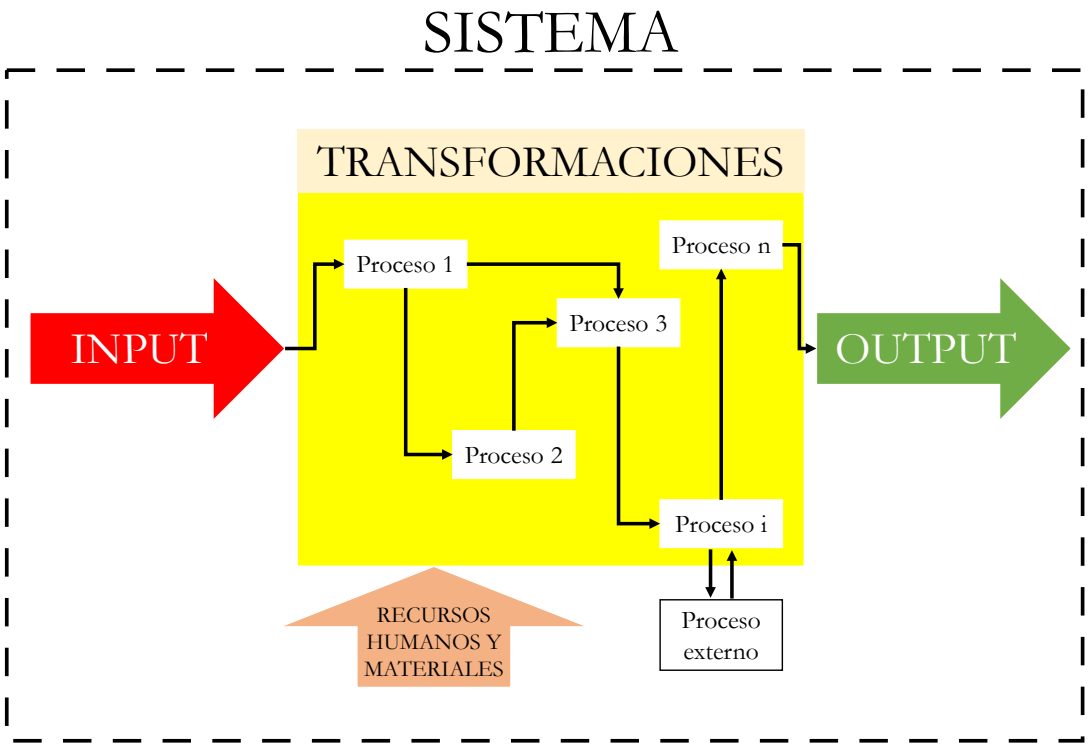


Figura 1. El sistema y sus elementos. Fuente propia

Entrada: El *input* hospitalario es el paciente que requiere un tratamiento médico. Este concepto debe entenderse de forma amplia, ya que los procesos asistenciales pueden ser muy variados: consulta, diagnóstico, análisis clínicos, ingreso hospitalario o cirugía. El paciente es el sujeto sobre el que se realizarán las distintas acciones hasta obtener el *output*. Esta definición puede resultar controvertida en el sentido de que se convierte al sujeto en un elemento pasivo. Es evidente que existen muchos límites a la aplicación de esta definición y que no por ello el paciente renuncia a sus derechos, pero a los efectos del enfoque de sistemas es el elemento que fluye a través de los distintos procesos.

Salida: El *output* del sistema es el elemento procesado a través de diferentes acciones. El resultado obtenido dependerá del camino que haya seguido, por ejemplo, el objeto final de un paciente ambulante que requiere una prueba de diagnóstico por imagen no es el mismo que el que requiere una cirugía o el que directamente es hospitalizado sin haber pasado por ningún otro servicio.

Proceso: Son todas las acciones realizadas sobre el elemento de entrada con el fin de obtener el *output*. Es el que se encarga de organizar y controlar el flujo del *input* a través del sistema. En el caso más simple solo existirá un proceso, pero no es lo habitual, ya que las diferentes tareas generan múltiples procesos y subprocesos que interactúan entre sí.

Proceso externo: Es aquel que no forma parte del sistema, pero cuyas entradas y salidas sí están incluidas. Son las razones de externalización de determinadas actividades el que no compense tener un recurso especializado para un uso puntual, o que los recursos materiales que lleva asociado sean demasiado costosos para el volumen de trabajo generado [102]. Otra de las razones habituales es que se aleja demasiado del *core bussiness* y es preferible tener el foco puesto en el núcleo del negocio. La externalización de actividades permite simplificar los procesos centrándose solo en lo importante, por lo tanto, es una forma de eliminar ineficiencias [103].

Interacción de los procesos: En muchas ocasiones los departamentos funcionan como compartimentos estancos, cuya optimización depende de que se alcancen sus objetivos particulares. Esta aproximación conceptual es necesaria para dividir las tareas en pequeños paquetes con el fin de asignar responsabilidades y controlar mejor los recursos, pero la realidad es que casi todos los procesos están relacionados unos con otros, o bien porque la salida de uno es la entrada de otro o bien porque el flujo de tareas depende de que los objetivos de ambos estén alienados [104]. Algunas de las acciones pueden asociarse o agruparse de forma natural, ya que pueden compartir recursos, responsables, o ser secuenciales. El problema surge cuando no se comprenden bien las relaciones entre diferentes procesos y, sin embargo, están influyéndose entre sí.

Recursos: La acción de añadir valor al *input* es realizada por los recursos, que se clasifican en los siguientes tipos:

(a) El recurso humano hospitalario se compone de diferentes profesionales sanitarios y no sanitarios. Son recursos especializados, que generalmente requieren de una formación previa para ejercer su trabajo. Los perfiles más frecuentes son los médicos, enfermeras o auxiliares. Otros perfiles menos conocidos son los técnicos especialistas en laboratorio de diagnóstico clínico (TEL), de radiodiagnóstico (TER) o técnico en farmacia, además de los no asistenciales: limpieza, cocina, servicios generales, seguridad, celadores, etc. [105].

El personal de mantenimiento es otro de los recursos no clínicos del hospital. Aunque se denomine mantenimiento de forma genérica, existen diferentes perfiles en función de la instalación o equipo en el que estén formados. Otra clasificación de este personal es la divide a los técnicos en generalistas o especialistas. El generalista realiza tareas básicas sobre un gran número de instalaciones o equipos, es personal de primera intervención. El técnico especialista tiene conocimientos más profundos sobre equipamiento específico, llegando a estar formado exclusivamente en algunas marcas y modelos concretos.

(b) La arquitectura hospitalaria hace referencia a los espacios donde se desarrollan los procesos. En general, el edificio debe haber sido diseñado con fines hospitalarios, ya que determinadas funciones requieren de características especiales que solo podrán ser satisfechas si se han tenido en cuenta previamente [106]. También es posible la adaptación de lugares que no estaban previstos para tales usos, pero en general, cuentan con limitaciones que solo permiten implantaciones parciales o encarecen la reforma. La arquitectura del edificio debe tener en cuenta el volumen, peso, conducciones y espacios que se necesitan para determinadas instalaciones de climatización o gases medicinales, así como soportar cargas de algunos equipos de masa elevada como las resonancias magnéticas[107].

(c) Las instalaciones hospitalarias se encuentran íntimamente ligadas a la arquitectura del edificio y a las acciones que se van desarrollar en su interior. Hay instalaciones que son generales y que deben ser incluidas por requisito legal. Sin embargo, el centro hospitalario requiere de instalaciones específicas para que se puedan realizar determinadas funciones [108]. La instalación eléctrica es una de las más importantes, como en cualquier edificio moderno, pero en el caso de un hospital se convierte en crítica, ya que hay determinados procesos que requieren de electricidad (sin interrupción) para mantener la seguridad del paciente. La climatización, filtrado y renovación del aire es otra de las instalaciones fundamentales para muchos de los procedimientos hospitalarios que requieren de un ambiente limpio (quirófanos o UCIs) o zonas con agentes infecciosos que deben aislarse del resto mediante sistemas de presión negativa [109]. Otra de las infraestructuras específicas sanitarias es la de gases medicinales, que son usados en varias zonas hospitalarias como urgencias, quirófanos, unidades de cuidados

intensivos y hospitalización. Además, se deben incluir las instalaciones de agua, saneamiento y gas para la producción de calor, que, aunque no se consideren con el mismo nivel de criticidad que las anteriores tienen impacto relevante en servicios como quirófano y UCIs [110].

(d) El equipamiento se define como todo aquel elemento necesario para el desarrollo del proceso, que no forma parte de las instalaciones y que tampoco es consumido en el mismo. El equipamiento habitual es el mobiliario (general y específico), equipos informáticos, electromédico y otros no sanitarios (cocina, cafetería). El equipamiento electromédico es el más importante de todos ellos, ya que permite que se desarrollen la mayoría de las actividades asistenciales. La presencia de estos dispositivos cada vez es mayor, tanto por el número de equipos usados, como por el número de procesos que los incorporan. Otra de las tendencias en estos dispositivos es la interconexión con plataformas de registro de datos para su incorporación a la historia clínica del paciente [111]. Complementariamente, el hospital cuenta con equipamiento informático que en muchas ocasiones se encuentra íntimamente relacionado con los dispositivos electromédicos, además de la función que cumplen de forma genérica.

(e) El material fungible y suministros es aquel que se consume en el proceso. Este concepto es realmente amplio, ya que abarca desde la medicación que se le suministra al paciente (incluidos los gases medicinales), hasta la electricidad consumida por cada proceso. Se suele hablar de elementos fungibles sanitarios como todo aquel material de uno o varios usos que se utiliza en determinados procedimientos. No siempre el material fungible es completamente consumido, sino que por cuestiones de higiene o esterilidad no tiene más aplicación de una o varias veces, por lo que el reciclaje del mismo tiene suma importancia. Otro de los materiales consumibles es la ropa, que por cuestiones de limpieza se cambia a diario o por uso como son las batas, pijamas, sábanas o la comida del paciente [112].

El sistema: Es el marco en el que se integran todos los conceptos anteriores. El sistema va más allá de la suma de las partes que lo componen debido a las interacciones que existen entre ellos. Los objetivos particulares de cada proceso deben estar alineados con los del sistema como conjunto, por lo que una organización demasiado segmentada o departamentalizada, puede tener objetivos específicos que estén compitiendo con los generales.

La realidad de muchas organizaciones es que la división departamental prevalece sobre la de procesos. En los hospitales esta división suele estar muy marcada por razones históricas. El sistema debe ser capaz de integrar la organización por procesos, sin perder todas las ventajas que se obtienen a través de la especialización departamental. Para ello se deben tener en cuenta las interacciones entre todas las partes.

2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

2.1 Objetivos

2.1.1 Objetivo general

El **Objetivo General (OG)** de esta Tesis Doctoral es analizar diferentes procesos hospitalarios para proponer soluciones contrastadas que aporten valor añadido al mantenimiento y a los procesos asistenciales, desde el punto de vista de la ingeniería.

2.1.2 Objetivos específicos

Se desarrollan objetivos específicos con el fin de resolver problemas concretos del área de mantenimiento y de otros servicios asistenciales. Concretamente se han definido tres objetivos en esta investigación, que hacen referencia a la mejora de procesos, correlación con diferentes partes del sistema y el uso de la información técnica.

Objetivo Específico 1 (OE1): Optimizar desde el punto de vista ingenieril procesos en el equipamiento de alta tecnología mediante la aplicación de metodología *Lean,* analizando su impacto en la mejora del mantenimiento.

Objetivo Específico 2 (OE2): Analizar las variables propias del mantenimiento y su relación con otras de tipo hospitalario, con el fin de obtener parámetros de gestión del mantenimiento a través de información asistencial y de infraestructura de fácil obtención.

Objetivo Específico 3 (OE3): Estudiar la posibilidad de utilizar los datos de mantenimiento como fuente de información estratégica para la aplicación en otros departamentos relacionados con la gestión del hospital, como pueden ser compras, finanzas, calidad, control o gestión.

Estos objetivos se desarrollan desde el enfoque de procesos. Se considera el hospital como un sistema con entradas, salidas, procesos, recursos humanos y medios materiales y consumibles cuyo fin es transformar un elemento en bruto en uno terminado u *output*. Se considera que el paciente fluye a través los procesos hospitalarios hasta que se alcanza un estado final, sobre el que se han añadido distintas acciones que aportan valor.

2.1.3 Objetivos complementarios

Se plantean varios objetivos complementarios, que se desarrollan en cada una de las soluciones propuestas.

Objetivo Complementario 1 (OC1): Analizar la reducción de los costes de mantenimiento del equipamiento electromédico. El impacto en la cuenta de resultados de los costes de mantenimiento es cada vez mayor debido al tipo tecnología empleada, cumplimiento de determinados requisitos legales y mayor uso de los equipos. Toda reducción conseguida en esta partida se traduce en liberación de recursos financieros para uso en otras áreas o como mejora de la eficiencia o viabilidad del sistema.

Objetivo Complementario 2 (OC2): Optimizar el funcionamiento de los equipos. La calidad del servicio de mantenimiento afecta de forma directa a muchos de los procesos asistenciales que dependen completa o parcialmente del uso de determinados equipos electromédicos. La disponibilidad anual, fiabilidad y garantía de reparación de los dispositivos se convierte un elemento crítico de muchos procedimientos que forman parte del *core bussiness* de la organización.

Objetivo Complementario 3 (OC3): Proponer herramientas que ayuden a la toma de decisiones en diferentes áreas. La obtención de información de mantenimiento, tanto para el propio departamento de ingeniería como para la parte asistencial, tiene una gran relevancia debido a la interacción tan importante que existe en el conjunto del sistema hospitalario.

Objetivo Complementario 4 (OC4): Recopilar información para el diseño de futuros centros hospitalarios, para poder hacer estimaciones rápidas o de orden de magnitud en el dimensionamiento del equipamiento electromédico y de posterior operación en fases tempranas de diseño.

Para ello, se definen variables que miden magnitudes asociadas al *input*, a los recursos, a partes del proceso o a cualquier otro elemento que resulte relevante para el estudio. Para su análisis se utilizan técnicas matemáticas, estadísticas y de representación de datos como gráficos, diagramas y tablas que permitan relacionarlas, transformarlas, minimizarlas, maximizarlas, agruparlas, clasificarlas, etc. Se asume que dentro del sistema todas las variables están correlacionadas en mayor o menor grado y que pueden usarse unas en lugar de otras si se ha encontrado una función que las vincule.

Las acciones desarrolladas en los diferentes objetivos de este trabajo actúan en el ámbito operativo, táctico y estratégico de la organización, así como en su correspondiente horizonte temporal de corto, medio y largo plazo.

2.2 Metodología

La metodología utilizada se centra en el estudio de una muestra de 12 hospitales de varias ubicaciones geográficas en España, de la que se disponen distintas bases de datos, documentación de activos, inventario, incidencias de mantenimiento, contratos de equipamiento, información asistencial, infraestructura hospitalaria y contabilidad y sobre la que se han aplicado una serie de técnicas y análisis basados en procesos y herramientas matemáticas y estadísticas para obtener resultados que posteriormente se han contrastado y validado.

2.2.1 Análisis muestral

El estudio se ha realizado en 12 hospitales de diferentes características y antigüedad a través de una muestra homogénea y representativa.

La tabla 1 muestra los parámetros básicos de los edificios.

Hosp.	Sup. (m²)	Camas	N. Quirófanos	Valor eq. (€)	Ant edif (años)/ Fecha última reforma
H1	24.538	164	10	4.773.264	6 (2020)
H2	23.300	198	13	7.281.377	14 (2018)
H3	18.756	170	11	5.172.948	49 (2020)
H4	9.196	84	7	2.055.032	59 (2017)
H5	8.643	110	8	3.833.616	49 (2017)
H6	8.462	86	7	1.628.773	18 (2019)
H7	7.565	35	8	1.857.093	66 (2017)
H8	6.178	99	5	1.595.164	61 (2018)
H9	3.369	60	5	1.349.359	32 (2017)
H10	2.881	37	3	1.277.872	18 (2020)
H11	2.494	26	3	1.092.178	56 (2018)
H12	2.314	20	3	1.503.879	58 (2019)

Tabla 1. Descripción de los hospitales

La superficie de los hospitales varía entre los 2.000 m² y 24.000 m². La antigüedad se encuentra en el rango entre 6 y 66 años, aunque los más antiguos tienen cada 2 o 3 años obras parciales que al cabo de varios años hacen que todo el edificio resulte reformado.

El número de camas se sitúa entre 20 y 198. En cuanto al número de quirófanos el rango va de 3 a 13.

El hospital con mayor valor de compra de equipamiento es de 7,3 M€, frente a los 1,1 M€ del menor. El número de personas de enfermería varía entre 38 y 191.

El hospital promedio tiene una antigüedad de 40 años, una superficie de 9.808 m², 91 camas y 7 quirófanos. El valor del equipamiento es de 2.785.046 €.

2.2.2 Bases de datos

El estudio se desarrolló durante los años 2018 y 2020 en 12 hospitales en España de diferentes Comunidades Autónomas, con un rango de camas instaladas entre 20 y 198.

Toda la información proviene de sistemas transversales que tratan los datos de forma estandarizada, con el fin de asegurar que estos sean comparables entre sí, ya que comparten los mismos criterios de adquisición y registro.

En la tabla 2 se describen las bases de datos usadas en la investigación.

Base de datos	**Administrador**	**Contenido**	**Adquisición y registro**
Inventario	Departamento de compras e inventario	Información sobre la descripción del equipo, ubicación, compra, periodo de garantía y tipo de mantenimiento.	El dto. de compras informa al de inventario sobre la adquisición de los nuevos equipos. Existe un número de identificación único que permite relacionar cada elemento con otras bases.
Incidencias	Departamento de ingeniería	Información relativa a las averías y a la fiabilidad de cada equipo.	Cualquier persona con acceso a la intranet puede solicitar una intervención sobre un equipo mediante el nº de identificación, relacionando la incidencia con la base de datos de inventario.
Contratos	Departamento de ingeniería	Información de los contratos firmados para la realización del mantenimiento preventivo y correctivo	Los contratos son revisados cada año uno de los responsables del área. Se analizan los equipos incluidos según coste y criticidad.
Asistencial	Departamento documentación e historia clínica	Información del uso que hacen los pacientes de los servicios del hospital: consultas, quirófanos, equipos de diagnóstico por imagen, habitaciones de hospitalización.	La información es generada en distintos momentos del proceso asistencial. Es registrada por el personal sanitario en un HIS (*Hospital Information System*).
Infraestructura hospitalaria	Departamento infraestructuras y proyectos	Planos, superficies, usos, camas, distribución de espacios, instalaciones	Proviene de los proyectos de arquitectura e ingeniería de los hospitales.
Contabilidad	Departamento de contabilidad	Datos sobre el coste de mantenimiento de los equipos.	Todas las facturas generadas se registran en el sistema de contabilidad de la empresa.
Personal de enfermería	Departamento de recursos humanos	Incluye número de personas por categorías, departamentos asociados, antigüedad y coste.	Se codifica el contrato de trabajo de cada persona y se mantiene actualizado con los cambios que se van produciendo.

Tabla 2. Descripción de bases de datos

2.2.2.1 Base de datos de inventario

La base de datos de inventario describe cada equipo a través de 14 campos que aportan información sobre la identificación, clasificación, descripción, ubicación, fecha de alta, garantías y precio de compra.

En la tabla 3, se describen cada uno de los campos de inventario.

Clase	Campo	Descripción	
Identificador	**1. ID**	Número de 6 dígitos que identifica de forma única cada ítem del inventario. Es el elemento común a las tres bases de datos que permite relacionarlas entre sí	
Clasificación	**2. Nivel 1**	Se establecen 2 categorías: electromedicina y diagnóstico por imagen	
	3. Nivel 2	Se establecen 17 categorías:13 pertenecen a equipos de electromedicina y 4 a diagnóstico por imagen	
		Electromedicina	**Diagnóstico por imagen**
		Monitorización	DIM Convencional
		Cirugía	DIM Alta tecnología
		Respiración	Ultrasonidos
		Rehabilitación	Digitalización imágenes
		Endoscopia flexible	
		Endoscopia rígida	
		Oftalmología	
		Esterilización	
		Neonatología	
		Odontología	
		Diálisis	
		Neurología	
		Dermatología	
	4. Nivel 3	Se definen 188 agrupaciones de equipos dentro de los niveles 1 y 2, como mamógrafo, telemando, convencional rx, ecógrafo, resonancia magnética, TAC, angiógrafo, digitalizador de rx, monitor de constantes vitales, pulsioximetro, tensiómetro, electrobisturí, torre anestesia, respirador, fibroscopio, videocolonoscopio, procesador de endoscopia, torre de laparoscopia, faco, esterilizador, cubeta de ultrasonidos, cuna térmica, incubadora, hemofiltro, electroencefalógrafo, polígrafo, bombas de perfusión	

Clase	Campo	Descripción	
Descripción	**5. Descripción**	Descripción específica del equipo con sus caracterísitcas individuales. Es un texto abierto en el que se definen las particularidades de cada ítem además de los tres niveles de clasificación	
	6. Marca	Es la marca del fabricante del equipo electromédico. Hay registradas 405 marcas	
	7. Modelo	La base de datos se compone de 2.204 modelos distintos	
Ubicación	**8. Hospital**	Se incluye el equipamiento de 12 hospitales	
	9. Zona	Cada hospital define sus propias zonas. En total la base datos contiene 789 ubicaciones. En algunos casos son zonas comunes entre hospitales y en otros se corresponden con lugares específicos de cada centro	
	10. Departamento	La clasificación departamental es común a todos centros. Existen 15 departamentos asistenciales	
		Quirófano	Hospitalización
		Consultas	Maternidad
		Diagnóstico por imagen	Oncología
		UCI pediátrica	Hemodinámica
		UCI de adultos	Diálisis
		Rehabilitación	Reproducción
		Endoscopias	Laboratorio
		Urgencias	
Fecha de alta	**11. Fecha alta**	Es la fecha en que el equipo fue incorporado a la base de datos. El primer inventario se realizó en enero de 2007.	
Garantías	**12. Inicio garantía**	Fecha de inicio de garantía	
	13. Fin garantía	Fecha de fin de garantía	
Precio	**14. Precio compra**	Es el precio de compra en euros y sin iva	

Tabla 3. Campos de la base de datos de inventario

La base de datos de inventario contiene todos los equipos que se encuentran en activo desde el periodo de 2007 a 2020, con un total de 4.347 registros.

No se contemplan los equipos que han sido dados de baja durante el periodo analizado.

2.2.2.2 Base de datos de incidencias

La base de datos de incidencias contiene información de las intervenciones realizadas en los equipos por averías o correctivos, las cuales son intervenciones no previstas que implican pérdida de funcionalidad. No están incluidas las intervenciones programadas, actualizaciones o del plan de mantenimiento preventivo.

Se compone de 21.550 registros. Todas las incidencias están asociadas a alguno de los 4.347 equipos inventariados, sin embargo, solo tienen intervenciones de mantenimiento un subconjunto del total de 2.397 registros, ya que hay 1.950 equipos sobre los que no se ha realizado ninguna actuación. El 60% de los equipos que han tenido intervenciones tienen menos de 5 actuaciones a lo largo toda su vida.

Los nueve campos de la base de datos de intervenciones correctivas se describen en la tabla 4.

Clase	Campo	Descripción
Identificador	**1. ID**	Se corresponde con el número de 6 dígitos de la base de datos de inventario que identifica al equipo. Es el dato que vincula las dos bases de datos
Fechas	**2. Comunicación**	Fecha en la que el proveedor asignado recibe el encargo de reparar el equipo
	3. Inicio reparación	Momento en que comienza la reparación del bien
	4. Fin reparación	Fecha en la que el equipo queda operativo
Mantenedor	**5. Mantenedor**	Empresa mantenedora a la que se ha encargado la reparación del equipo.
Descripción	**6. Descripción**	Texto abierto en el que se describe el problema que presenta el equipo.
Solución	**7. Solución**	Texto abierto en el que especifica la solución aportada por el proveedor para reestablecer el estado normal de funcionamiento del equipo electromédico
Costes	**8. Mano de obra**	Costes de la mano de obra empleada sin IVA en euros
	9. Materiales	Costes de los materiales empleados sin IVA en euros

Tabla 4. Campos de la base de datos de correctivos

El campo 1. ID es compartido con la base de datos de inventario, lo cual permite combinar la información de ambas tablas.

2.2.2.3 Base de datos de contratos

La base de datos de contratos es un subconjunto de la de inventario en la que se especifica si el equipo tiene asociado un contrato de mantenimiento, alcance, número de revisiones preventivas y coste.

Se mantienen 2.424 equipos mediante 32 contratos, es decir, el 56% del total de la base inventariada (4.347). Estos ítems tienen en común la realización de uno o más mantenimientos preventivos. Esto queda definido en el alcance del contrato, en el que se indica qué costes correctivos quedan incluidos: mano de obra o integral (mano de obra y materiales).

El resto de dispositivos (1.923) no tienen contrato asociado, sin embargo, esto no quiere decir que no sean mantenidos, sino que en caso de requerir una intervención se realizará bajo presupuesto del proveedor que le corresponda.

En la tabla 5 se presentan los campos que componen la base de datos contratos.

Clase	Campo	Descripción
Identificador	**1. ID**	Se corresponde con el número de 6 dígitos de la base de datos de inventario que identifica al equipo. Es el dato que vincula las dos bases de datos
Mantenedor	**2. Mantenedor**	Es la empresa con la que se ha firmado el contrato. Se mantienen 2.424 equipos, incluidos en 32 contratos con diferentes alcances.
Alcance	**3. Alcance**	Se establecen tres niveles de mantenimiento contratados: Preventivo: Una o varias intervenciones programadas Preventivo + Mano de obra: Incluye al anterior y toda la mano de obra generada en las intervenciones correctivas Integral: Incluye al anterior y cualquier material que sea necesario sustituir en cualquier actuación. Suelen estar excluidos los malos usos, negligencia o daños por catástrofe
Nº preventivos	**4. Frecuencia**	Es el número de mantenimientos preventivos que se realizan a los equipos bajo contrato. Se establecen de 1 a 4 revisiones anuales.
Coste	**5. Coste contrato**	Es el coste del equipo en el contrato en función del alcance que se haya contratado sin IVA en euros

Tabla 5. Campos de la base de datos de contratos

El campo 1. ID es el que permite vincular información las bases de datos descritas en los apartados anteriores.

2.2.2.4 Base de datos asistenciales

Esta base de datos contiene el número medio de actos médicos producidos en el periodo de análisis de 2018 a 2020. Se considera un acto como la realización de una serie de acciones médicas sobre un paciente, establecidas en un proceso.

Se han analizado 7 actos médicos basados en el proceso de diagnóstico, cirugía e ingreso hospitalario:

Consultas médicas: Los hospitales disponen de consultas con diferentes especialidades usadas como el primer de nivel de atención sobre el paciente. Son las encargadas de realizar el diagnóstico de la dolencia. La mayoría de las consultas resuelven el problema sin necesidad de ingreso hospitalario o intervención quirúrgica. Para acceder a una consulta es necesario tener una cita programada.

Urgencias: La urgencia es una consulta con características especiales. Funciona 24 horas al día y no requiere de cita programada. Es un complemento a las consultas ordinarias para aquellos casos en los que, a criterio del paciente, no puede esperar la atención. En este servicio disponen de forma presencial de algunas especialidades (medicina interna, pediatría, ginecología, traumatología, etc.) y mediante guardia localizada otras menos demandadas. Dispone diversos equipos de electromedicina y del apoyo de laboratorio, farmacia y de departamento de diagnóstico por imagen.

Pruebas de diagnóstico por imagen: Es un proceso de apoyo al diagnóstico. Requiere de equipos que permiten obtener imágenes del interior del cuerpo a través de diferentes tecnologías y principios físicos. En la mayoría de los casos necesitan de interpretación por un médico especializado llamado radiólogo.

Ingresos hospitalarios: Este acto hace referencia a la entrada al sistema hospitalario de un paciente, para ser tratado de cualquier dolencia, que requiera la permanencia en el centro. Una vez dentro puede ser derivado al proceso de quirófano, unidad de cuidados intensivos u hospitalización. El ingreso puede ser programado o derivado desde la urgencia.

Tiempo de estancia: Es el tiempo de permanencia en días del paciente ingresado. Es una medida de la ocupación del hospital, ya que se compara con el valor máximo establecido por el número de camas de hospitalización y de unidades de cuidados intensivos.

Cirugías con ingreso: Se refiere a los pacientes que ingresan para ser tratados mediante cirugía en el proceso de quirófano y que posteriormente pasarán a hospitalización o la unidad de cuidados intensivos.

Cirugías ambulantes: Hace referencia a los pacientes que requieren de cirugía que no supone el ingreso posterior y permanencia en el centro hospitalario.

2.2.2.5 Base de datos de infraestructura hospitalaria

El edificio y su infraestructura proporcionan el escenario donde se realizan las diferentes funciones hospitalarias. La arquitectura debe permitir el desarrollo adecuado de los procesos que contiene, de forma que el diseño dé soporte a la funcionalidad. La estructura del edificio debe estar adaptada para albergar las instalaciones necesarias para desarrollar la actividad prevista. Sin embargo, en algunas ocasiones es necesario adaptar el procedimiento de trabajo a los espacios existentes, por ejemplo, cuando se producen cambios en la ubicación de los servicios o si se utilizan edificios que no fueron previstos para uso sanitario.

Se ha contado con los planos de arquitectura e instalaciones del hospital en formato digital. En ellos se rotulan las diferentes zonas del centro. En la mayoría de los casos se hace coincidir la denominación del espacio con el uso al que está destinado, sin embargo, pueden existir procesos que desarrollen su actividad de forma transversal y no queden limitados a una ubicación concreta. En otras ocasiones en un mismo espacio quedan contenidos diferentes procedimientos y la denominación del área toma el nombre de uno de ellos o incluso otro distinto. También existen zonas del hospital nombradas por una referencia espacial absoluta como los puntos cardinales.

La tabla 6 muestra la información utilizada de infraestructura hospitalaria.

Base de datos	**Descripción**
Superficies	Es la medida de las áreas de diferentes zonas. Se pueden emplear distintos criterios de segmentación: por plantas, servicios o procesos, departamentos, zonas relacionadas, aparcamiento, zonas climatizadas, zonas aseguradas por grupo electrógeno, sectorización de incendios. El uso que se haga de cada segmentación dependerá del análisis que se quiera realizar
N. camas de hospitalización	Es un dato relacionado con el tamaño y con el uso general que tiene el hospital. El número de camas está vinculado a la rotación del paciente por habitación o tiempo de estancia. De esta forma en centros con especialización de corta estancia (por ejemplo, maternidad o cirugía menor) es inferior, mientras que en cuidados paliativos, enfermedades crónicas u oncología las estancias son mayores y pueden requerir mayor volumen de camas.
N. camas de unidades cuidados intensivos (UCI):	Las UCIs pueden considerarse un tipo especial de hospitalización, ya que tienen una vigilancia de 24 horas del paciente mediante equipamiento de monitorización y personal médico y de enfermería. El volumen de camas está relacionado con el tipo de intervenciones quirúrgicas y complejidad de los casos tratados.
Número de quirófanos	Hace referencia al tamaño y especialización del hospital, así como a la complejidad de los casos tratados. Es habitual que al aumentar el número de quirófanos algunos de ellos se encuentren especializados debido a las necesidades distintas de equipamiento que requieren

Tabla 6. Información de infraestructura hospitalaria

En algunas ocasiones es necesario obtener información de detalle sobre el contenido de cada zona como mobiliario o equipamiento electromédico. En estos casos es necesario hacer una comprobación de la situación real y completar la información de los proyectos y planos, sobre todo de los elementos móviles.

La información usada proviene de superficies segmentadas por zonas, servicios, plantas, camas de hospitalización y de cuidados intensivos y quirófanos.

2.2.2.6 Base de datos de contabilidad

El departamento de contabilidad proporciona la información de costes de mantenimiento. Los costes fijos provienen de los contratos firmados con los diferentes proveedores. Estos costes están predeterminados, ya que una vez pactado el precio anual, éste no varía. El resto de costes son los denominados variables, ya que aparecen de forma imprevista cuando los equipos se averían.

El departamento de contabilidad codifica cada gasto según el hospital en el que se han producido y según una partida presupuestaria asociada a la tipología del equipo como se muestra en la tabla 7. Cada partida tiene una cantidad de dinero fija, basada en el histórico de gasto y en volumen de equipos de cada centro.

Familia	**Partida presupuestaria**	
	Contratos	**Correctivos**
Electromedicina	MT510	MT520
Diagnóstico por imagen	MT610	MT620

Tabla 7. Partidas presupuestarias

El acceso a esta información se puede realizar a través de un programa de *Business Ingeligence* (*Microsoft BI*). Para ello se ha diseñado un cuadro de mando o *dashboard,* para el departamento de ingeniería, con el fin de realizar consultas en tiempo real de los costes de mantenimiento registrados a nivel contable.

2.2.2.7 Base de datos de personal asistencial

Se considera personal asistencial aquel que desarrolla actividades relacionadas con el *Core Business* de la organización. De forma particular se ha usado información sobre el personal médico, enfermería y auxiliares de enfermería.

Como personal de apoyo se han tenido en cuenta los técnicos de laboratorio, farmacia y de diagnóstico por imagen.

La información sobre el número de personas y categorías de cada centro ha sido proporcionada por el departamento de recursos humados, el cual es una función central que contiene todos los datos en una base única.

2.2.3 Variables de medición de los procesos

Para este estudio se han elegido 14 variables independientes y 5 dependientes de distintos procesos de tipo asistencial y no asistencial de 12 hospitales, conformando una matriz de dimensión 19 x 12. Los 228 valores del estudio han quedado fijados en el periodo de 2018 a 2020. En la tabla 8 se muestran las variables independientes y dependientes del modelo.

VARIABLES INDEPENDIENTES		**VARIABLES INDEPENDIENTES**		**VARIABLES DEPENDIENTES**	
Asociadas a los recursos		***Asociadas al uso del paciente***		***Asociadas al mantenimiento***	
Superficie útil del hospital (m²)	ARE	Consultas anuales (nº)	CON	Tiempo medio de resolución de incidencia (días)	TIM
Número de camas (nº)	BED	Pruebas radiológicas anuales (nº)	DIM	Número de incidencias anuales (nº)	NUM
Número de quirófanos (nº)	OPR	Urgencias anuales (nº)	EME	Coste anual de materiales empleados en las intervenciones(€)	MAT
Antigüedad del edificio (años)	BUA	Ingresos hospitalarios anuales (nº)	ADM	Coste anual de las horas de trabajo empleadas en las intervenciones(€)	LAB
Valor de adquisición de equipos (€)	AQV	Cirugías con ingreso anuales (nº)	SUR	Coste anual total (€)	TOT
Antigüedad de equipos (años)	EQA	Cirugías ambulantes anuales (nº)	AMB		
Personal de enfermería(nº)	NUR	tiempo total de estancia hospitalaria (días)	STA		

Tabla 8. Descripción de las variables utilizadas en el estudio

Las variables independientes se han dividido en 2 grupos, las de recursos empleados en los procesos y las que indican el uso que los pacientes hacen del hospital. Las variables dependientes son las que están asociadas al mantenimiento.

Variables independientes de recursos: Son las de tipo material o humano necesarias para la realización de las tareas previstas en los procesos.

Diseño arquitectónico del hospital: En el diseño de un centro hospitalario intervienen cientos de variables. En este estudio se han seleccionado como variables representativas de un centro el número de quirófanos (OPR), superficie (ARE) y antigüedad del edificio (BUA). Adicionalmente se ha tenido en cuenta el número de camas (BED) que, si bien no es estrictamente arquitectónico, sí queda condicionado por aquellos espacios que pueden ser usados como hospitalización.

Dotación de equipamiento. El procedimiento de compras en un hospital es uno de las funciones estratégicas, ya que influye directamente en la calidad del servicio. Afecta tanto a los equipos de uso general como los específicos. Se han elegido dos variables como representantes de este grupo: valor de adquisición de los equipos de electromedicina (AQV) y su antigüedad (EQA).

Recursos humanos. Casi todas tareas realizadas en un hospital requieren de personas en alguna parte del proceso, por muy automatizado que este se encuentre. En este estudio se ha tomado como referencia el perfil profesional de enfermería y auxiliares (NUR), transversal a muchas actividades. La enfermería

forma parte de la gran mayoría de procesos asistenciales por lo que su elección resulta adecuada para tratar de encontrar otras relaciones.

Variables independientes de uso de recursos: Miden el uso que el paciente hace de los recursos del hospital o más exactamente de la demanda de recursos (una cantidad dividida por la unidad de tiempo). En este caso se han tomado variables de departamentos la urgencia, el diagnóstico por imagen o consultas. Particularmente se han seleccionado las siguientes variables:

Número de ingresos hospitalarios anuales (ADM): Es una medida directa del *input* al sistema. Es el valor total de pacientes que hacen uso del hospital.

Número de consultas (CON) y de urgencias anuales (EME): Es un indicador relacionado con el acceso del paciente al hospital, ya que un porcentaje de estas acaban siendo un *input* de sistema.

Número de pruebas anuales de diagnóstico por imagen (DIM): Está relacionada con las dos anteriores, ya que es una actividad de apoyo al diagnóstico en consultas y urgencias.

Número de cirugías anuales ambulantes (AMB) y con ingreso hospitalario (SUR). Es una medida de la actividad hospitalaria a través de uno de sus procesos.

Días de estancia hospitalaria (STA). Es un valor relacionado con la rotación de pacientes hospitalizados en el centro, con el tipo de actividad que se desarrolla y con la complejidad de los procesos llevados a cabo en el hospital.

Variables dependientes de mantenimiento: Hacen referencia al funcionamiento del área de mantenimiento, particularizado en los equipos electromédicos. Miden el desempeño del departamento a través del volumen total de incidencias, tiempo de atención y costes asociados:

Tiempo medio de resolución de incidencias (TIM): Es una medida de la calidad o nivel de servicio.

Número de incidencias resueltas anualmente (NUM): Es un indicador del volumen de trabajo. Está relacionado con el número de equipos y con su uso.

Coste anual de los materiales (MAT) y de la mano de obra (LAB) de las reparaciones: Es una medida del coste de mantenimiento desglosada en los dos elementos en los que se divide habitualmente el proceso de reparación.

Coste anual total (TOT): Son los costes globales de reparación de los equipos electromédicos. Mide la eficiencia de los recursos financieros invertidos.

2.2.4 Herramientas matemáticas

2.2.4.1 Análisis cuantitativo TIR y VAN

Para el análisis de soluciones se usará un modelo de TIR y VAN [113]. Es una herramienta que permite valorar la rentabilidad de una inversión en función de la inversión inicial y de los flujos de caja o ingresos a lo largo de un periodo de tiempo prestablecido.

VAN es el acrónimo de valor actual neto, es el beneficio de un proyecto en el que se realiza una inversión inicial y en los siguientes periodos se obtienen unos ingresos, por lo tanto, es una diferencia entre ingresos y gastos. La fórmula incluye una variable llamada tasa de descuento k que se aplica a los ingresos de cada periodo con el fin de tener en cuenta el coste del capital o coste de oportunidad de la inversión.

$$VAN = \sum_{i=0}^{n} \frac{f_i}{(1+k)^i} \qquad (1)$$

donde i representa el número de periodos analizados, f_0 la inversión inicial y f_i (con i=1…n) los ingresos y k es a tasa de descuento de la inversión.

Por otro lado, TIR o tasa interna de retorno, es la denominación del valor particular de k que hace que el VAN sea nulo. Es un valor de referencia que indica el punto de equilibrio en el que el proyecto es rentable. Para TIR<0 la inversión no se recupera.

$$0 = \sum_{i=0}^{n} \frac{f_i}{(1+TIR)^i} \qquad (2)$$

Las variables anteriores se han particularizado en este estudio de la siguiente manera.

Inversión inicial f_0: La inversión inicial se calcula mediante las horas de trabajo de personal interno para la implementación de la solución multiplicado por su coste/ hora en negativo.

Ingresos f_i: Se estima la reducción del tiempo de realización de la tarea y se multiplica se multiplica por el ingreso unitario/ tarea.

Tasa de descuento k: Se utiliza un valor de referencia como coste el capital o coste de oportunidad, índice de precios al consumo (IPC) o cualquier otro comparador que se considere.

Con la información anterior se calcula el VAN, TIR y el tiempo de recuperación de la inversión (*payback*) de cada solución de forma independiente y del conjunto de soluciones.

2.2.4.2 Herramientas estadísticas

Las correlaciones entre variables se obtenido mediante técnicas de regresión lineal. Se trata de una herramienta de matemática estadística que permite aproximar la relación de dependencia de una variable con un conjunto de variables independientes. En su forma más sencilla se usa una sola variable independiente y es denominado modelo de regresión lineal simple. Si se usan más variables independientes se llama regresión lineal múltiple.

En los modelos de regresión lineal simple, se calcularon los coeficientes de determinación R^2, con el fin de establecer el grado de relación entre las distintas variables.

Para los modelos de regresión lineal multivariable se realizó un análisis de la varianza a través del estadístico *F de Fisher-Snedecor* y se calculó el estadístico *t de Student* para determinar la significación cada variable independiente en los distintos modelos. Se realizaron pruebas de normalidad y homocedasticidad.

Para estudiar la relación entre A y B cuando hay más de dos variables presentes y otros factores son fijos se realizó un análisis de correlación parcial [114]. Cuando la variable de control es fija, el coeficiente de correlación parcial entre las variables A y B se calcula según la siguiente ecuación:

$$r_{AB.C} = \frac{r_{AB} - r_{AC} r_{BC}}{\sqrt{1-r^2{}_{AC}} \cdot \sqrt{1-r^2{}_{BC}}} \qquad (3)$$

Donde r_{AB} es el coeficiente de correlación convencional entre *A* y *B*, r_{AC} es el coeficiente de correlación convencional entre *A* y *C* y r_{BC} es el coeficiente de correlación convencional entre *B* y *C*.

Además, para explorar la existencia de interrelaciones entre las variables de mantenimiento y las asistenciales, se realizó un estudio estadístico inferencial. Para ello se realizaron pruebas de análisis de varianza (ANOVA), comprobando que las muestras seguían una distribución normal y similar varianza aplicando el test de Levene. En el análisis se establecieron las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula (H_0): Las variables analizadas no tienen relación entre sí.

Hipótesis alternativa (H_1): Las variables analizadas están interrelacionadas

Para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas, el valor de *p* se confrontó con el nivel de significación, y así evaluar la hipótesis nula (H_0). Si el valor *p* es menor o igual que el nivel de significación indicado ($p \leq 0.05$), la hipótesis nula se puede rechazar y se puede afirmar que no todas las medias de población son iguales. Por el contrario, si $p > 0.05$, se considera que no existe suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula.

2.2.5 Procedimientos y documentación del sistema

El procedimiento es el documento en el que se establecen las tareas y responsables de realización para uno o varios procesos relacionados. Al formar parte de un sistema, se considera que estos procesos interactúan con otros departamentos: compras, farmacia, mantenimiento, limpieza, hospitalización, urgencias, admisión, consultas, unidades de cuidados intensivos o quirófano.

Es común que los procedimientos vayan acompañados de gráficos que ayuden a comprender mejor las relaciones en él descritas [115]. El más habitual es el diagrama de flujo en el que se representa el camino que sigue el elemento procesado a través de las diferentes acciones que van añadiendo valor al producto.

En algunos casos es necesario ampliar la información descrita en el procedimiento, por lo que se usan documentos adicionales denominados instrucciones técnicas en los que se describen de forma detallada la realización de determinadas tareas.

2.2.5.1 Diagnóstico por imagen

El procedimiento de diagnóstico por imagen es el documento que describe el proceso de realización pruebas de diagnósticas en el servicio. Está integrado en el conjunto documental del sistema de gestión del hospital.

En el protocolo se distinguen 3 subprocesos: paciente hospitalizado, paciente de urgencias y paciente ambulante. En cualquiera de los casos anteriores puede ser necesaria la preparación del paciente para la prueba.

Las imágenes obtenidas se almacenan en un servidor de uso exclusivo llamado PACS *(Picture Archiving and Communication System*). Las imágenes son transmitidas según un estándar denominado DICOM (*Digital Imaging and Communication On Medicine*), el cual permite transmitir e identificar las imágenes del paciente independientemente del origen adquisición (resonancia magnética, TAC).

Las imágenes adquiridas son analizadas por el radiólogo para generar un informe que describe las imágenes y si son representativas de alguna patología. Existen algunas pruebas en las que no es necesario la realización de informes, como las radiografías solicitadas por los médicos de urgencias [116].

El proceso finaliza cuando el paciente y/o prescriptor tiene acceso a las imágenes y al informe realizado por el radiólogo. Si el prescriptor pertenece al hospital tiene acceso directo al PACS.

El informe de operación es un documento en el que se indica cuál ha sido el uso de cada máquina según equipo y tipo de prueba. Esta información se puede agregar en documentos destinados a la dirección del hospital o como *input* de otros informes. También se usa como elemento de control de doble chequeo para la facturación, junto con el volante individual de cada prueba.

2.2.5.2 Citación y agenda

El procedimiento de citación y agenda es un proceso de apoyo para la programación de pruebas diagnósticas. Da soporte a consultas y laboratorio.

Para obtener una cita se puede hacer a través de un *callcenter,* de la página web o aplicación móvil o presencialmente en los mostradores habilitados para ese uso.

Para las pruebas radiodiagnósticas, el procedimiento consiste en agendar las solicitudes en la lista de trabajo de cada máquina. Si el origen es interno se distingue entre prueba urgente u ordinaria. Todas las peticiones provenientes de UCI se considerarán urgentes. Si la prueba es demandada por la urgencia se valorará si es necesario realizarla en el momento.

La citación de consultas no requiere de lista de trabajo. Se asigna al paciente el hueco disponible o se le da a elegir si existen varios. Para solicitar una consulta no es necesaria una prescripción.

2.2.6 Programas y desarrollos informáticos

Se han usado diferentes aplicaciones informáticas comerciales y de diseño a medida en esta investigación, así como desarrollos propios.

El análisis matemático se ha realizado en *Microsoft Excel y SPSS*. Se ha elegido *Excel* como *software* general debido a la flexibilidad que ofrece para los cambios y teniendo en cuenta que en esta fase de investigación no se requieren desarrollos informáticos a medida u otro tipo de aplicaciones más especializadas. El uso de *SPSS* se ha limitado a los análisis estadísticos.

Particularmente, se han representado en *Excel* las rectas de regresión y los coeficientes de determinación R^2, así como los cálculos de TIR y VAN. También los gráficos se han elaborado en esta aplicación.

Además de las anteriores aplicaciones se ha usado el *software* diseñado a medida del grupo de hospitales para la gestión del mantenimiento asistido por ordenador. Basado en la exportación de datos del GMAO se ha programado una herramienta de análisis de datos en *Excel* como complemento al módulo de informes.

2.2.6.1 Software de gestión de mantenimiento asistido por ordenador

Realizar reparaciones no es equivalente a gestionar el mantenimiento. La gestión implica establecer objetivos, planificar, registrar información, analizar resultados y tomar decisiones basadas en hechos. Para el desempeño de estas funciones es necesario un *software* que facilite y sistematice este trabajo. Esta aplicación se denomina de forma genérica gestión del mantenimiento asistido por ordenador o *Computerized Maintenance Management System (CMMS).*

El grupo de hospitales cuenta con una aplicación creada mediante un desarrollo propio desde el año 2007 que organiza la información de los equipos, planifica y registra las intervenciones y ayuda a la toma de decisiones de mantenimiento. Este *software* tiene las siguientes funcionalidades:

Base de datos de inventario: Es la información de los equipos que son susceptibles de ser mantenidos. Es información estática acerca de la descripción del bien a través de alguna clasificación y la marca, modelo, número de serie. Puede incluir datos sobre la ubicación, coste.

Base de datos de incidencias: Se compone de los datos que provienen de las intervenciones realizadas sobre cada equipo. Está asociada al bien sobre el que se ha actuado y contiene información de la avería, solución aplicada, técnico que ha intervenido, horas de trabajo y materiales empleados.

Herramientas para la planificación de intervenciones: Se conoce como el plan de mantenimiento preventivo. En este calendario se asocian las fechas de previstas de intervención con el número de identificación del equipo.

Herramientas de consulta: Esta funcionalidad permite recuperar la información almacenada y presentarla según diferentes criterios búsqueda o restricciones: intervalos de fechas, tipología, ubicación, técnico de reparación.

Herramientas de análisis: Se combinan varios datos con el fin de obtener información nuevos.

Sistema de alarmas: Consiste en mensajes que aparecen cuando se cumple algún tipo de condición. Las alarmas pueden clasificarse según su nivel de criticidad y establecer diferentes medios para su comunicación.

Por otro lado, el *software* utilizado tiene las siguientes limitaciones:

Integrabilidad: Consiste en la posibilidad de funcionamiento dentro de otros sistemas informáticos de la organización, presentes o futuros. No es posible conectarlo con otras bases de datos relacionadas.

Movilidad: Se refiere a la posibilidad de uso en distintas plataformas o con distintos sistemas operativos. Solo es posible el uso mediante un navegador.

Parametrización: Es la capacidad de adaptación del *software* a las necesidades de la organización, tipo de gestión y clase de equipos mediante ajustes de funcionamiento. Solo es posible realizar cambios mediante programación, ya que el sistema no es parametrizable.

Actualización: Aplicable en general al *software* comercial. Cualquier actualización debe ser valorada *ad hoc*, como incorporación de mejoras, cambios de funcionalidad, etc.

2.2.6.2 Herramienta para el análisis de datos de mantenimiento

Se ha desarrollado en *Microsoft Excel* una herramienta para el análisis del desempeño del mantenimiento.

En el modelo se combinan tres bases de datos, que contienen información sobre el inventario o activos, actuaciones correctivas y contratos de mantenimiento de cada equipo en un determinado periodo de tiempo.

Es una herramienta para la toma de decisiones estratégicas a través de un conjunto de medidas basadas en la combinación de diferentes variables que generan indicadores parametrizables que permiten dar respuesta, ayudar o facilitar la gestión de planes de renovación de equipamiento, análisis de nuevos contratos y existentes, nivel de servicio o costes de mantenimiento.

De forma particular el modelo programado se compone de:

- Métricas: Son medidas propias de cada equipo para el periodo de tiempo analizado, por lo tanto, son estáticas y siempre devuelven el mismo resultado. Son una caracterización de cada registro.
- Indicadores: Es una combinación lineal de métricas. Es un elemento parametrizable en el que se debe decidir qué medidas formarán parte de él y qué peso se le asigna.

El modelo permite realizar un análisis individual por equipos o de forma agrupada por familias, tipología, departamento, marcas, procesos y tecnología. También puede segmentarse por periodos de tiempo o alcance de contrato.

La aplicación propuesta permite la evaluación del desempeño del mantenimiento en el corto, medio y largo plazo. Tiene aplicación en las áreas de mantenimiento, compras, presupuesto y financiera.

3. TÉCNICAS Y HERRAMIENTAS APLICADAS

En este capítulo se describen pormenorizadamente las principales herramientas aplicadas en la Tesis Doctoral de la metodología *Lean*, así como otras de tipo general, justificando su utilización y, sobre todo, las condiciones de contorno para su aplicación.

3.1 *Herramientas Lean*

A lo largo de la historia los trabajos especializados eran realizados por los artesanos, los cuales realizaban todas las tareas desde el principio hasta el final. Al ser la demanda pequeña y no contar con sofisticados medios productivos. Según Mintzberg (1989) esta forma de trabajo se denomina estructura simple [117]. Sin embargo, este modelo tiene como desventajas el largo periodo de formación del artesano hasta que domina las distintas técnicas del proceso, la falta de homogeneidad del producto final (o de estandarización) y los tiempos de producción elevados. Como principales ventajas tiene la flexibilidad ante cambios y sobre todo la minimización de aparición de actividades que no aportan valor al producto final o *Non Value-Adding* (NVA) [118].

Esta situación comenzó a cambiar con la llegada de la revolución industrial en el siglo XIX, a través de la producción por procesos y la aparición de economías de escala. Taylor (1911) estableció la base de la organización de la producción a partir de la aplicación de método científico a procesos, tiempos, equipos, personas y movimientos [119].

Por otro lado, a principios del siglo XX, Henry Ford introdujo el concepto de producción en cadena para la fabricación de automóviles, en la que se hizo un uso intensivo de la normalización de los productos, la utilización de máquinas para tareas elementales, la simplificación de tareas y recorridos, la sincronización entre procesos, la especialización del trabajo y la formación específica. Estas acciones y técnicas fueron posibles en un contexto en el que se podía establecer rígidamente una producción en masa de grandes cantidades de producto.

El modelo de producción en masa, se caracteriza por tres elementos: existencia de departamentos especializados o islas de procesos que buscan su máxima eficiencia sin tener en cuenta el proceso global y al cliente, creación de

una superestructura departamental que se encarga de la planificación de la producción y coordinación entre áreas y rigidez ante cambios en la demanda, tales como variaciones en las características del producto terminado o de la velocidad de producción.

Los elementos anteriores acaban generando gran cantidad de actividades sin valor añadido (NVA), ya que la organización acaba necesitando un gran esfuerzo en la coordinación y planificación de las tareas [120]. Los departamentos desconocen objetivos finales y sus acciones particulares pueden acabar actuando unos contra otros, haciendo que el cliente quede insatisfecho por no haberse cumplido sus expectativas. Aun así, el modelo resultaba perfectamente válido en ese contexto porque las NVA de los procesos quedaban compensadas con creces cuando el volumen de producción era alto.

En la segunda mitad del siglo XX, esta forma de organización de la producción empezó a mostrar sus primeros signos de agotamiento. La compañía Toyota comprobó que los beneficios de este modelo desaparecían cuando el nivel de producción era bajo, ya que todas las NVA existentes hacían inviable el sistema de producción. Toyoda y Ohno (1949), dos ingenieros de la compañía, se plantearon cómo mantener las ventajas del sistema anterior (trabajo por procesos, especialización, aseguramiento de la calidad) en el nuevo contexto y surgió de forma natural la solución: reducir o eliminar las NVA [121]. Comenzaron a analizar el origen de las acciones sin valor añadido, a cuantificar su coste y proponer nuevas soluciones.

De esta manera surgió el *Toyota Production System* (TPS). El sistema se formula a través un principio muy simple: producir solo lo que se demanda y cuando el cliente lo solicita. Bajo esta filosofía aparecieron otras técnicas como el sistema *Kanban, Jidoka, Poka–Joke* que fueron enriqueciendo el sistema Toyota [122]. El TPS se apoya en los siguientes elementos:

- *Just in Time*: Producir lo que se necesita en el momento preciso. Este sistema permite la reducción de stocks y los tiempos de fabricación. Se basa en el control del flujo.
- *Jidoka*: Es un sistema automático o semiautomático que permite parar la producción cuando se detecta un fallo para que el elemento procesado no continúe avanzando en la cadena. Con esto se pretende no añadir más valor a un producto defectuoso y poder analizar y comprender por qué se produjo el fallo.
- *Kaizen*: Son técnicas para la aplicación de la mejora continua. Involucra a todas las personas de la organización, desde la dirección hasta los operarios. Se centra en la simplificación de procesos, el comportamiento humano, la creatividad, la calidad y la eliminación de desperdicios.

- *Heijunka*: Son técnicas para la nivelación de la producción, es decir, adaptar el flujo de producción con el fin de reducir el impacto causado por las fluctuaciones de la demanda y sus efectos en los inventarios.

Debido al éxito que tuvo esta nueva forma de organización del trabajo, muchas compañías e investigadores estudiaron el modelo y trataron de exportarlo a otras organizaciones y entornos. En concreto Womack, Jones y Ross (1997) desde el Instituto de Tecnología de Massachusetts fueron quienes le dieron el nombre de *Lean Manufacturing* [123].

Desde sus orígenes en Toyota hasta su popularización en la década de 1990 el modelo *Lean* ha ido expandiéndose a distintos sectores industriales más allá del automovilístico, servicios, administración o sanidad [124]. Por esa razón se suele hablar de *Lean* simplemente o añadir el calificativo del sector. Se pueden encontrar denominaciones generales como *Lean Manufacturing*, *Lean Management* o de sector como *Lean Healthcare*.

La aplicación de *Lean* en los entornos sanitarios plantea algunas resistencias que provienen de los propios profesionales del sector [125]. Una de las críticas más frecuentemente esgrimidas es que el origen automovilístico de la metodología no es aplicable a un sector tan distinto en los procesos, profesionales y producto procesado (paciente) como es el sanitario. Sin embargo, la respuesta a esta aparente limitación de *Lean* se encuentra en su propia metodología, ya que asume que cada proyecto es único y por lo tanto sujeto a su propio contexto, no necesariamente conectado con el sector industrial.

Womack y Jones proponen la figura del agente de cambio que debe conocer la organización y conseguir la implicación de los profesionales para posteriormente formarlos [126]-[127].

Particularmente, para la aplicación *Lean* en el sector salud o *Lean Healthcare*, se debe tener cuenta que el proceso sanitario puede llegar a ser complejo y variable en los resultados [128]. En él intervienen personas con distintos objetivos que pueden no estar bien alineados. Por otro lado, es importante distinguir entre paciente y cliente, ya que es habitual que estas dos figuras no coincidan: uno es el receptor del servicio y el otro es quien paga [129]. En muchos sectores esta dualidad no existe y puede costar algo de trabajo entender su relación.

El valor debe establecerse desde la perspectiva del paciente, que es el sujeto procesado en este modelo.

3.1.1 La herramienta A3

El A3 es una de las herramientas centrales de la metodología *Lean* [130]; se trata de un documento visual en el que se exponen los objetivos del proyecto, su contexto, análisis de las ineficiencias, soluciones propuestas y plan de acción, y seguimiento de los resultados. Se asume que no toda la información puede quedar recogida en un documento con formato DIN A3, pero aquella que aparezca debe ser la más relevante. Si fuera necesario se pueden mantener otros registros adicionales.

En algunas ocasiones no se puede restringir el tamaño del papel a una determinada dimensión, ya que no se puede correr el riesgo que el problema quede mal planteado. La filosofía subyacente que hay detrás de usar un solo papel es obligar a realizar un ejercicio de síntesis de la información y que esta se presente en mismo espacio visual [131].

Por lo tanto, el A3 es un espacio conceptual y la forma de materializarlo puede ser una pizarra con *postits*, un rollo de papel continuo o una simple hoja DIN-A4.

Es una herramienta para el cambio que conecta la situación inicial y con la final dentro de un determinado contexto, quedando estrechamente relacionada con otros modelos de transformación como el círculo de Deming o de mejora continua PDCA [132]. En estos modelos se busca transformar una situación de partida en otra nueva en la que se han incorporado mejoras o se han desechado ineficiencias.

Otro de los usos relevantes que tiene esta herramienta es como vehículo de comunicación. El A3 se caracteriza por la sencillez, síntesis y visibilidad en la presentación de la información, lo que permite trasladar de forma eficaz el planteamiento del problema y sus mecanismos de solución a los propietarios del proceso, afectados, relacionados y terceras partes. Da una visión de conjunto que ayuda a la participación y facilita en gran medida el proceso de *feedback* de información para todas las partes.

Particularmente en este estudio sobre el mantenimiento del equipamiento electromédico se desarrolla un A3 con 5 apartados en los que se describe en entorno, la situación inicial, el análisis de las ineficiencias, la solución propuesta, y un plan de acción e implantación:

Entorno y demanda: En este apartado se realiza un análisis del entorno y del contexto en el que se presenta el problema. Al alcance de este apartado queda circunscrito a toda información que resulte relevante para el análisis. Por lo tanto, en línea con la idea de síntesis y concreción solo debe incluirse datos útiles para el estudio. En este caso, se hace especial hincapié en la arquitectura del edificio, equipamiento y recursos humanos de diagnóstico por imagen y del departamento

de ingeniería y mantenimiento. El otro elemento fundamental incluido en este apartado es la descripción de la demanda o *Takt Time*. La demanda en un proyecto *Lean* se entiende cómo el ritmo de producción, por lo tanto, se relaciona el elemento procesado con la variable tiempo.

Situación inicial: Consiste en describir el planteamiento del problema. La metodología *Lean* ofrece distintas opciones para describir la situación de partida, si bien no son únicas y dependerá del proyecto y de sus características particulares. En este caso se han usado dos: el Mapa de Flujo de Valor o *Value Stream Mapping* (VSM) y el *espagueti chart*. Son herramientas clásicas de *Lean* con aplicación válida en este estudio en un hospital. El VSM permite organizar las tareas en mapa, conectándolas con flechas que indican el sentido en que avanza el proceso. El *espagueti chart* es una herramienta para el análisis del movimiento de personas u objetos en un espacio físico, representado por un plano. Finalmente, en este apartado se especifica el *Takt Time* definido en el punto anterior. El cálculo del *Takt Time* se realiza mediante suma de los tiempos parciales de cada tarea y de su porcentaje de ocurrencia. Por lo tanto, se obtiene un valor promedio. En el VSM se dibuja al lado de cada tarea el tiempo calculado.

Análisis de ineficiencias: El análisis del VSM y el *espagueti chart* permite identificar las ineficiencias del proceso. Como complemento a las herramientas anteriores se debe emplear la metodología de observación de tareas o *Gemba*. Para comprender e identificar los puntos del procedimiento que no añaden valor y que suponen un desperdicio de recursos es necesario estar en el lugar dónde se desarrolla el proceso. El *Gemba* implica interacción del observador con las personas que realizan las tareas [133]. A continuación, se deben investigar las causas que han dado lugar a los desperdicios de recursos. Puede ocurrir que existan causas comunes que afecten a varios elementos, pero en cualquier caso cada pérdida de valor debe asociarse a su causa. Las ineficiencias se pueden incluir en el VSM usado una numeración, un código de colores o formas y dibujándolas junto a las tareas asociadas. Adicionalmente, se describen en una tabla, incluyendo la causa y asignando una numeración.

Situación propuesta: En esta parte se buscan soluciones a las NVA identificadas. Puede haber soluciones que sirvan para varias ineficiencias a la vez o soluciones para una única causa. Para facilitar el análisis se usa una matriz denominada de Impacto-Accesibilidad, de forma que cada ineficiencia se sitúa mediante un sistema de puntuación en 1 de los 4 cuadrantes de la matriz. Cada cuadrante indica la prioridad de actuación, bien sea por facilidad de aplicación de las medidas o bien por el impacto que tiene acometerlas. Finalmente, se plantean las distintas soluciones, representándolas en una tabla junto a las ineficiencias que resuelven y describiendo en qué consisten. Todo lo anterior es el resultado del análisis cualitativo de la nueva situación propuesta. A continuación, se realiza el análisis cuantitativo a través de la reducción del *Takt Time*, construido como suma parcial de cada solución, y el impacto económico según un análisis utilizando las

herramientas de TIR y VAN. Tanto las soluciones, como la mejora del *Takt Time* se pueden representar en el VSM final.

Plan de acción e implantación de soluciones: El plan de acción permite establecer el orden y la prioridad implementación de cada solución. Una herramienta gráfica que permite visualizar el área responsable de cada solución y el momento en que se realizará es el mapa de transformación, que consiste en un gráfico radial en el que el radio representa el tiempo y los sectores angulares se asignan a los diferentes responsables, de forma que en cada sección del cilindro se dibujan las soluciones que correspondan. Una vez establecido el plan de acción se debe gestionar cada solución como un proyecto independiente en el que se analizarán los objetivos, alcance, fases, recursos y programación.

A continuación, se muestra en la figura 2 un esquema del A3 con los apartados descritos anteriormente.

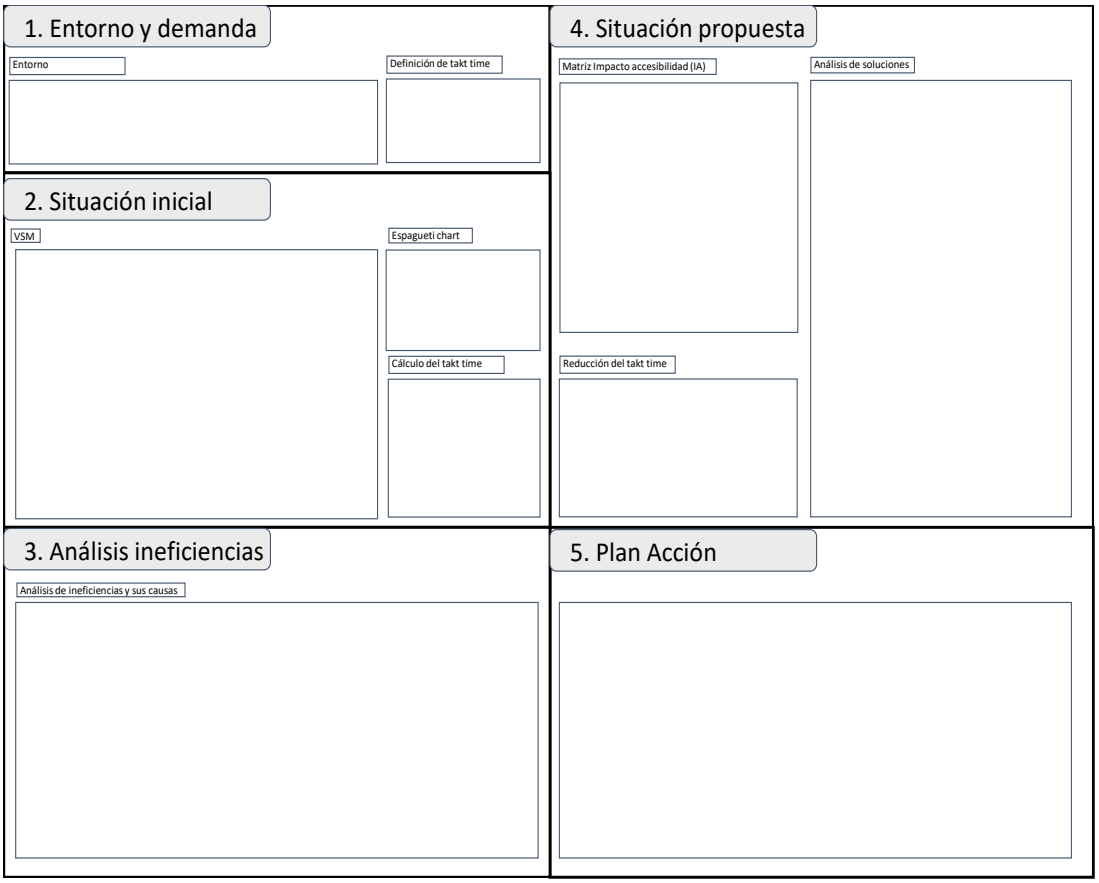


Figura 2. Modelo de A3. Fuente propia

3.1.2 Takt time

Takt Time es una adaptación de la palabra japonesa *takutotaimu*, que a su vez fue tomada de la palabra alemana *taktzeit* introducida por ingenieros alemanes en la primera mitad del siglo XX. En ambos casos se interpreta como el ritmo producción o tiempo de fabricación de algo en un determinado ciclo repetitivo [134].

La demanda del cliente (D) se define como el número de unidades producidas en una unidad de tiempo. El *Takt Time* (TT) se define como el tiempo de producción de cada unidad demandada por el cliente. Por lo tanto, el *Takt Time* es el inverso de la demanda. Ambos conceptos miden el mismo hecho, que es el ritmo de producción, si bien el valor calculado es el *Takt Time*, una vez determinada la demanda del cliente, que viene dada desde fuera. Esto quiere decir que la demanda la establece el cliente como un número de unidades requeridas dividido por la unidad de tiempo y el *Takt Time* se calcula como su inverso de forma que nos indica el tiempo de producción de cada unidad para cumplir con la demanda.

El valor de referencia del *Takt Time* es el tiempo mínimo de producción de una unidad (TT_{min}), que está relacionado con los recursos empleados para su producción. Este valor no puede cambiarse sin cambiar la infraestructura, recursos u organización del proceso:

$$\frac{1}{D} = TT = \frac{Tiempo\ mínimo\ de\ producción}{ud} + Tiempo\ de\ holgura = TT_{min} + TH \quad (4)$$

De la ecuación anterior se establecen diferentes escenarios basados en el tiempo de holgura (TH):

Escenario 1: TH>0: Existe un excedente de capacidad de producción. En este caso si aumentase la demanda del cliente sería posible atenderla. Si la ratio TH/TT fuera muy elevada la capacidad productiva estaría sobredimensionada con un tiempo disponible de producción ocioso elevado.

Escenario 2: TH=0: La demanda está ajustada al *Takt Time* mínimo. No hay capacidad para asumir un aumento de demanda. La capacidad productiva está aprovechada al máximo.

Escenario 3: TH<0: Esta sería una situación hipotética, ya que la holgura negativa quiere decir que no se está atendiendo toda la demanda por falta de capacidad productiva. Si no es posible aumentar la capacidad de producción habría que derivar o externalizar el exceso de demanda a otro lugar o comunicar que no es posible atender toda la demanda del cliente.

3.1.3 Gemba

Gemba es otro término japonés que se puede interpretar como el lugar de trabajo o el lugar donde ocurren las cosas [135]. Es un concepto desarrollado por Ohno, creador del *Toyota Production System*. Una de las historias más popularizadas sobre este concepto es que Ohno solía llevar una tiza en el bolsillo y cuando se encontraba algún problema en una parte del proceso, dibujaba un círculo en el suelo y les pedía a sus colaboradores que permaneciesen dentro de ese círculo observando hasta que comprendieran el origen del problema.

Este concepto toma especial relevancia en mantenimiento, ya que comprender el funcionamiento de las instalaciones y equipamiento permite diagnosticar averías y mejorar la operativa. Estar en el *Gemba* quiere decir que se está en lugar donde realmente se está produciendo la acción. Pero no se debe entender simplemente con permanecer en ese lugar, sino observar para entender, interactuar con las partes y las personas para aprender e interiorizar el proceso analizado.

Para observar en el sentido *Lean* es necesario aprender a mirar. Tener a un responsable que observa el trabajo que hacen otros, como mínimo puede resultar extraño, cuando no intimidante para el observado. Es importante cumplir con una serie de normas.

El observado en el proceso debe conocer las razones por las que hay un observador. Se deben compartir los objetivos que se persiguen en esta acción. La observación debe entenderse como un proceso bidireccional, es decir, el observador debe preguntar todo aquello que no comprenda o que le resulte extraño o anómalo. De esta manera se puede contextualizar de una forma más precisa el problema, ya que se enriquece la información recogida.

Se debe generar un clima de confianza con los profesionales que trabajan en el proceso, ya que de esa manera podrán compartir la información y conocimiento que tienen. Es posible que ni el diseñador tenga tanta información como el usuario de cómo funciona en realidad el proceso, por lo que se debe escuchar atentamente sus comentarios, sin desechar ninguna parte por insignificante que parezca.

Se debe registrar todo lo observado, tanto lo que se ha percibido simplemente mirando, como lo que el usuario ha contado. Además, se pueden usar otras formas de registro como fotografías, equipos de medida, esquemas, anotaciones, etc.

El objetivo último del *Gemba* es hacer una inmersión profunda en el funcionamiento del proceso con el fin de identificar tareas que no añaden valor, desperdicio de recursos, cuellos de botella, condiciones de trabajo inseguras, demandas de los trabajadores y poder proponer soluciones que eliminen o minimicen estas ineficiencias.

3.1.4 Herramienta VSM

VSM son las siglas de *Value Stream Mapping*, mapa del flujo de valor o diagrama de flujo de valor. En cualquier caso, el VSM es una herramienta gráfica que permite identificar y representar las acciones que se realizan a lo largo del tiempo sobre el elemento procesado al ir pasado por distintas fases en las cuales se va añadiendo algún tipo de valor [136]. En la aplicación a un entorno hospitalario el VSM muestra cómo evoluciona un paciente, una muestra biológica, una prueba de diagnóstico por imagen o información de paciente desde un determinado punto hasta el final del proceso.

El VSM debe representar la situación real y no el deseo de cómo debería ser, por lo que es importante que se apoye en el *Gemba*, si bien debería usarse toda la documentación previa que exista de la descripción del proceso. La primera decisión que se debe tomar antes de la representación del VSM es establecer cuál es el alcance o límites del procedimiento observado, es decir, puede que no resulte útil empezar por el mapa global de la empresa, ya que existirán números procesos y subprocesos que se deben analizar por separado.

En el VSM no se puede representar toda la información que se ha sido adquirida durante el proyecto, sino que se debe limitar a aquella que permita identificar las acciones y responsables del proceso y sus ineficiencias. En el mapa se deben incluir las tareas que se realizan sobre el elemento procesado, los movimientos físicos, flujos de información, almacenaje, transporte, colas y tiempos de espera. Para ello, se usan iconos estandarizados que permiten la rápida identificación de tareas similares. También pueden usarse códigos de colores o formas si de esa manera se facilita el análisis. Las acciones en un proceso se pueden clasificar en tres grupos [137]:

Con valor añadido o *Value-Adding* (VA): Son tareas que convierten el producto en bruto en uno elaborado o semielaborado (usando terminología fabricación), a través de la aplicación de mano de obra o de la transformación o adición de algún elemento material, intangible o información.

Necesarias, pero sin valor añadido o *Necesary but Non Value-Adding* (NNVA): No aportan valor, pero son requeridas por el proceso. Se puede plantear su eliminación o minimización a través del rediseño. En este caso puede implicar cambios en la infraestructura o en procesos relacionados.

Sin valor añadido o *Non Value-Adding* (NVA): No aportan valor, por lo tanto, son acciones que se deberían eliminar. El VSM debe centrarse en identificar estas tareas, ya que consumen recursos sin ninguna contraprestación o mejora del producto final percibida por el cliente.

Los 7 desperdicios más habituales de las operaciones NVA son las siguientes:

Sobreproducción: Se procesa más de lo requerido. Esto implica un aumento de los niveles de inventario y consumo de medios productivos no requeridos por la demanda. Da lugar a un desalineamiento entre la función productiva y la comercial, sobrecargando a esta última por tener que dar salida a un excedente desajustado con la demanda, lo cual se puede traducir en una reducción del precio venta.

Recursos ociosos: Hace referencia a recursos materiales y mano de obra que están disponibles para la producción de bienes a los que no les llegan elementos para procesar. Si la demanda no requiere producir de forma planificada, se pueden emplear estos tiempos en tareas de mantenimiento o en formación de los recursos humanos. Se sitúa en el extremo contrario a la sobreproducción.

Transporte: Los movimientos deben ser lo mínimos para mantener el flujo de producción. De forma general el transporte debe ser considerado un desperdicio hasta que no se demuestre que es estrictamente necesario. La doble manipulación de producto implica desperdicio de recursos, aumento de tiempos de producción y mayor riesgo de deterioro o reprocesado.

Procesamiento inadecuado: Se refiere a las acciones realizadas sobre el producto que no aportan ninguna mejora. Son acciones innecesarias que aumentan los tiempos y costes de producción sin aumentar la calidad del bien ni añadir ninguna ventaja. Se aumenta el riesgo de errores en el procesado y en la sobreutilización de los recursos productivos.

Inventario innecesario: El sobre estocaje se traduce en una inmovilización de recursos financieros que podrían usarse en otras áreas. Se aumenta el riesgo de deterioro, caducidad y de forma general de pérdida de valor del producto almacenado. También lleva asociado un desperdicio en el transporte y movimientos asociados hasta dejarlo en el almacén.

Movimientos innecesarios: Estos movimientos no se refieren al transporte de los bienes, sino a pequeños movimientos de manipulación del objeto, como rotaciones, colocación, ajustes. Además de afectar al tiempo de producción, afecta al trabajo manual de los operarios, que puede dar lugar a sobreesfuerzos o cansancio.

Defectos: Son fallos de producción que afectan a las especificaciones iniciales del producto y a la calidad esperada. Afectan a toda la cadena de producción, ya que cuando son detectados es necesario reprocesarlos desde el momento en que se produjo el fallo, retrasando los elementos previos de la cadena productiva. Si no son detectados pueden afectar a la satisfacción del cliente final con el producto.

En la figura 3 se representa la forma clásica de realización de un VSM, en la que se establecen tres bandas para el flujo de información, de materiales y línea temporal.

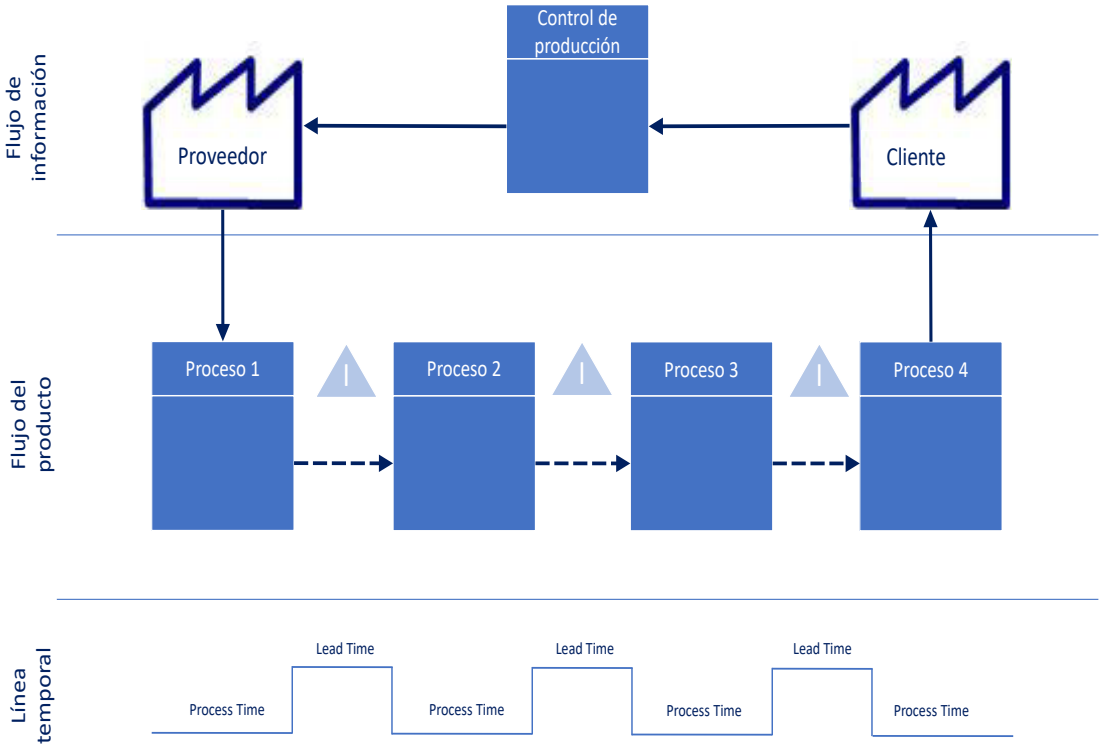


Figura 3. Ejemplo de VSM clásico

En el VSM clásico se diferencia claramente el flujo de información del flujo físico, dado que el medio por el que se transmiten en ambos casos es muy diferente. La línea temporal incluye los tiempos de procesado de cada tarea y los tiempos de espera o de cola antes de cada proceso. El tiempo total de producción se calcula como la suma de todos los tiempos parciales de producción y de los tiempos de espera.

Otra forma de representación es el VSM administrativo, el cual requiere para su realización identificar todas las tareas del procedimiento, incluyendo duración, realizador, probabilidad de ocurrencia y secuencia. Los realizadores se colocan a la izquierda del gráfico con una banda de color que se lee de izquierda a derecha. Las tareas se representan mediante un cuadrado dentro de la banda que le corresponde según su realizador. La secuencia de acciones queda definida por las fechas que unen cada elemento del diagrama. En el caso de que existan caminos alternativos, se dibuja un rombo que ofrece dos opciones para la continuidad del flujo.

Cada tarea lleva asociado un tiempo de realización y una probabilidad de ocurrencia, ya que algunas de ellas quedan condicionadas a determinados eventos. Las tareas que tienen tiempo de realización 0 son aquellas que no afectan al *Takt Time* del proceso analizado. En el caso de que se produzcan tareas en paralelo se usará la que más duración tenga.

En la figura 4 se muestra un VSM administrativo.

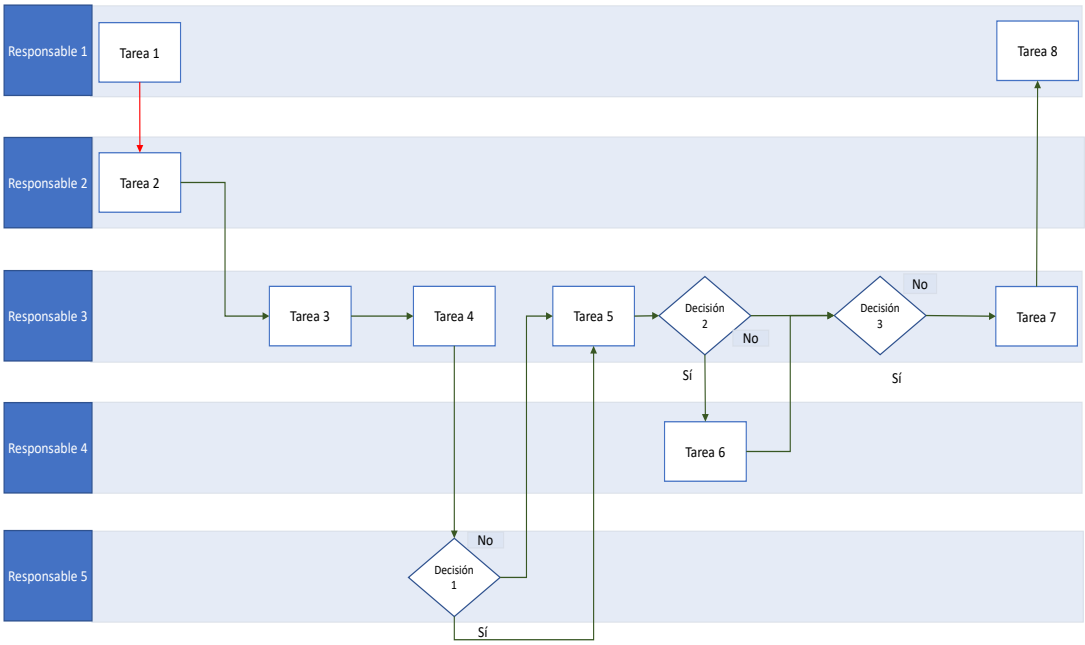


Figura 4. Ejemplo de VSM administrativo. Fuente propia

Para que un diagrama de flujo, tal y como se ha descrito hasta ahora, se convierta en una herramienta para el análisis del valor añadido es necesario añadir otros elementos. Para ello se realiza un análisis de cada tarea intentando identificar posibles ineficiencias. Si se han encontrado se dibuja un círculo numerado al lado de cada tarea. Cada círculo también tiene asociado un código de color, que posteriormente se usará para clasificar las ineficiencias por el impacto en los resultado y accesibilidad de la solución planteada. Los colores usados son verde, amarillo y rojo. Esta codificación se explica en el apartado de la matriz impacto-accesibilidad.

Al lado de cada acción del flujograma se incluye el *Takt Time* (TT) de cada tarea. El *Takt Time* total se calcula como la suma de los tiempos parciales según su porcentaje de ocurrencia.

Este gráfico se irá enriqueciendo con otra información obtenida del análisis, de manera que se podrán incluir las soluciones propuestas y las variaciones de *Takt Time* debidas a la optimización del proceso.

3.1.5 Espagueti chart

El curioso nombre que recibe esta herramienta visual de *Lean*, cobra especial sentido cuando se observa el tipo de gráfico que produce. Es una herramienta complementaria al VSM enfocada a la identificación de desperdicios de tipo movimiento innecesario o transporte. Se puede aplicar tanto a recursos materiales como humanos, así como al elemento procesado.

El punto de partida es un plano de la zona a analizar que represente las distintas ubicaciones del estudio. Para realizar el gráfico se sigue a la persona u objeto de análisis marcando con un bolígrafo de forma continua por los lugares por donde va pasando. El seguimiento se puede aplicar durante una o dos horas, para que el gráfico recogido permita un mejor análisis y no resulte demasiado cansado o aburrido tanto para el observador como para el observado. El objeto de esta herramienta no es identificar tanto los lugares a los que se dirige el sujeto u objeto de observación sino la cantidad y frecuencia de movimientos realizados.

En la figura 5 se representa un plano hecho a mano para usar en un estudio *espagueti chart*. Si el plano está a escala se pueden calcular las distancias recorridas y frecuencia de acceso a determinadas zonas y valorar sin son acciones VA o NVA.

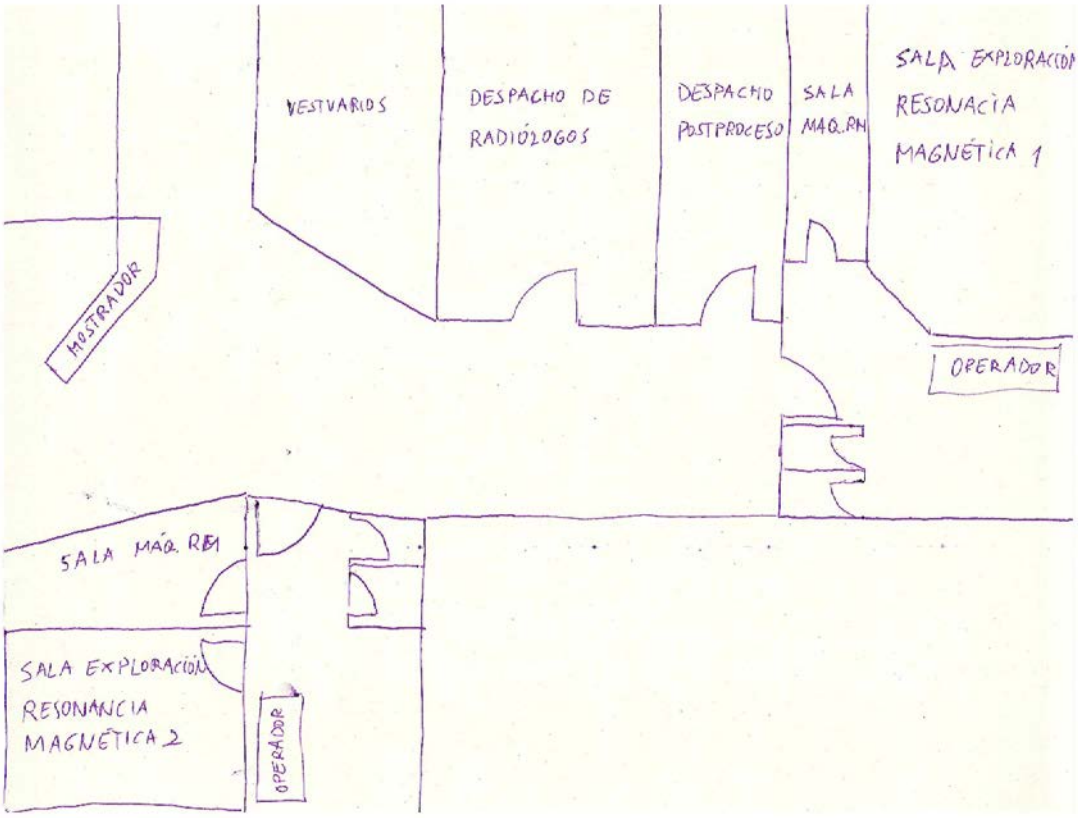


Figura 5. Croquis zona de zona de estudio para *espagueti chart*. Fuente propia

3.2 Herramientas de proyectos

3.2.1 Matriz de impacto accesibilidad

La matriz de impacto accesibilidad (IA) no es propiamente una herramienta *Lean*, pero resulta muy útil para la visualización y priorización de las acciones. La matriz IA permite priorizar el abordaje de los desperdicios, actuando en primer lugar sobre aquellos que tienen un alto impacto y fácil realización y pasando a último lugar aquellos con poca importancia y baja accesibilidad. Para su construcción se puntúa cada ineficiencia con un par de valores del 1 al 6 según las dos dimensiones. A continuación, se representan las coordenadas en un gráfico.

Para facilitar el análisis, el gráfico se divide en 4 zonas del mismo tamaño, que se pueden representar con colores diferentes para hacerlo más visual. Cada cuadrante implica una metodología de actuación, a la vez que permite hacer una primera clasificación por prioridades. En la figura 6 se representa la matriz.

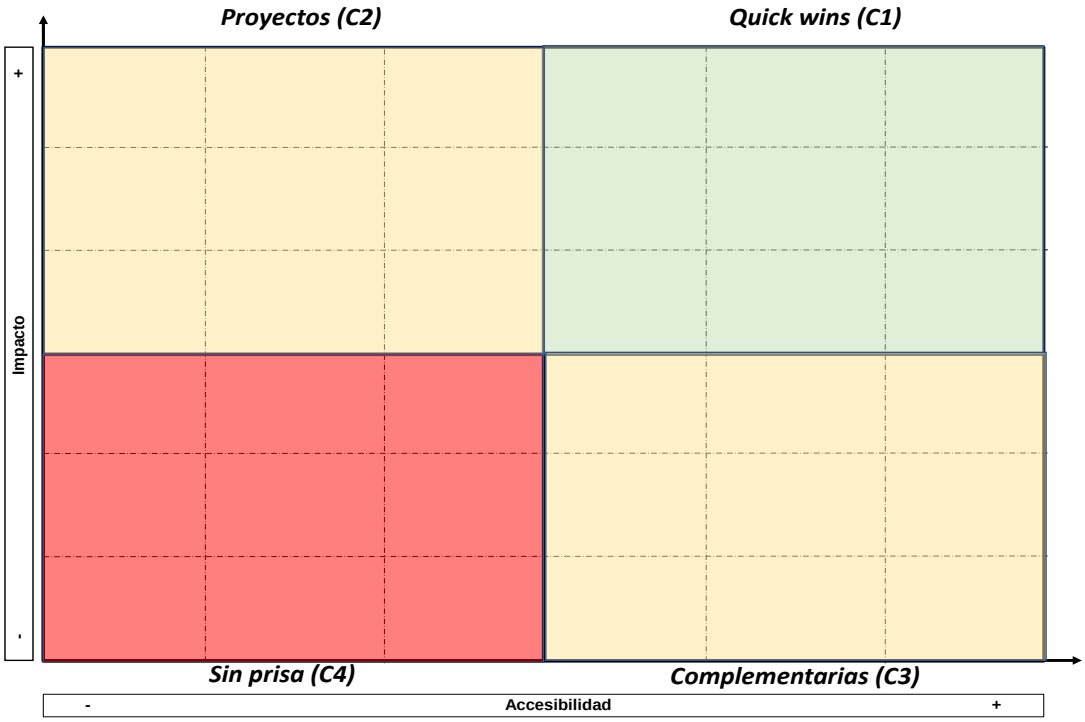


Figura 6. Matriz de impacto accesibilidad. Fuente propia

***Quick Wins* (C1):** Alto impacto y alta accesibilidad o soluciones de acción inmediata. Se presentan en la matriz con color verde.

Proyectos (C2): Alto impacto y baja accesibilidad o acciones importantes que generalmente requieren de proyecto para su ejecución. Se dibujan en amarillo.

Complementarios (C3): Bajo impacto y alta accesibilidad o soluciones de prioridad media. Se representan con color amarillo.

Sin prisa (C4): Bajo impacto y baja accesibilidad o no prioritarias (en rojo).

3.2.2 Gestión de proyectos

La gestión de proyectos tampoco no forma parte de la metodología *Lean*. En este estudio se aplica como herramienta de planificación y seguimiento de las soluciones planteadas.

Se ha realizado una ficha de planificación y seguimiento, que de forma simplificada incorpora algunas de las herramientas de la gestión de proyectos que se describen a continuación:

Objetivo y alcance: Se explica cómo se realizará la implantación de la solución y se define su alcance. Se contextualiza la solución propuesta y se indican si esta da una respuesta total o parcial a la necesidad planteada en el proyecto.

Duración: Se estima una duración total. Este dato proviene del análisis completo del proyecto, una vez planteadas sus fases y valorados los recursos disponibles para su realización. La duración real puede verse afectada durante la implantación por diversas circunstancias que se reflejarán en el gráfico de seguimiento.

Fases: Se establecen los hitos principales del proyecto en dos niveles: fase y subfase. Las tareas no son un simple listado de acciones, sino que se encuentran relacionadas a través de una serie restricciones que definen el orden de realización. Esto se representa en un diagrama de Gantt.

Diagrama de Gantt: Es un gráfico temporal en el que se representan las tareas con una línea o rectángulo proporcional a su duración y con origen en el momento en que comienza. Cada tarea se relaciona con líneas llamadas precedencias, que representan las restricciones de orden de realización. En el diagrama se actualizan los cambios que se producen respecto de la situación original programada.

Recursos: Se especifican los recursos humanos y materiales que son necesarios para la realización del proyecto. Estos recursos pueden ser propios o externos.

Seguimiento: Se indica el estado del proyecto en el momento de redacción de este documento y se describen las principales dificultades que se han encontrado a modo de seguimiento de la gestión de riesgos.

Reducción de *Takt Time*: Al finalizar el proyecto se comprueba si la implantación de la solución ha supuesto efectivamente una reducción del *Takt Time* y si ha sido según la prevista en la propuesta *Lean*.

4. RESULTADOS

4.1 Optimización de procesos de equipos de alta tecnología

El resultado de un proyecto de optimización basado en metodología *Lean* siempre queda reflejado en el documento A3. Este documento contiene la información necesaria para la definición del problema, descripción de la situación inicial, análisis de ineficiencias, propuestas de solución y plan de acción. En los siguientes apartados muestran los resultados de aplicar las herramientas *Lean* para obtener el A3 en un equipo de alta tecnología hospitalaria.

4.1.1 Entorno y demanda

En este apartado se establece el contexto en el que se desarrolla el proyecto y se define la variable que se va a optimizar llamada demanda o *Takt Time*.

4.1.1.1 El proceso de diagnóstico por imagen

En la figura 7 se presenta el diagrama de flujo de diagnóstico por imagen.

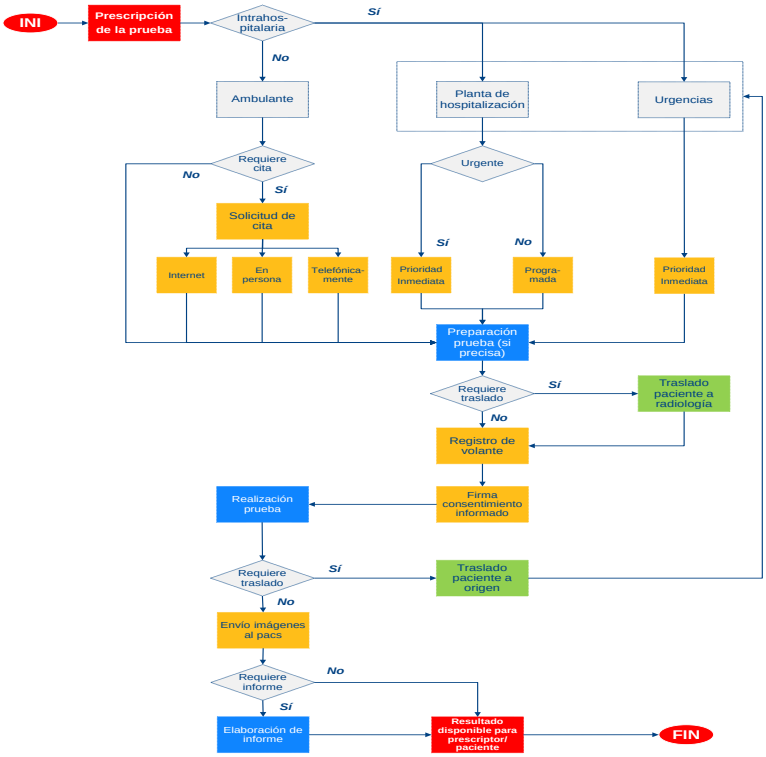


Figura 7. Diagrama de flujo del servicio de DIM. Fuente propia

Este procedimiento hace referencia a la gestión completa del servicio. Se pueden identificar distintos subprocesos para la realización de tareas específicas. Algunas de las acciones incluidas en el diagrama forman parte o se encuentran relacionadas con otros procesos, ya que la interacción en el conjunto del sistema hospitalario suele ser muy alta.

En el diagrama se puede observar que las formas o símbolos del flujograma en rojo son el inicio y fin del procedimiento, es decir, el origen o *input* y el resultado u *output*. Las azules representan las acciones principales y las de color amarillo hacen referencia a actividades administrativas, de gestión de documentación o de apoyo. Las verdes representan traslados o movimientos físicos del paciente.

En la tabla 9 se describen los subprocesos del servicio.

Tipo	Proceso	Descripción
Origen	Prescripción de la prueba	Forma parte de los procesos de diagnóstico o seguimiento del paciente de otros servicios
Citación	Atención en mostrador, internet o telefónicamente	Tramitación administrativa para el acceso a las pruebas del paciente extrahospitalario o ambulante
Plantas	Programación y preparación del paciente para la prueba	Está incluido también en el proceso de hospitalización
Urgencias	Solicitud y traslado inmediato para pruebas	Compartido con el proceso de urgencias
Traslados	Movimiento de pacientes	Realizado por los celadores. Es un proceso transversal, gestionado por servicios generales
Preparación	Preparación de la prueba	Realizada por el propio paciente ambulante según instrucciones o por el hospital en el caso del paciente ingresado
Realización	Realización de la prueba	Es uno de los procesos propios del servicio de diagnóstico por imagen. No es único, ya que cada máquina tiene variantes en función de la tipología: RM, TAC, mamografía, rx, ultrasonidos
Registro	Envío de imágenes al PACS (servidor imágenes)	Es una tarea automática que realiza cada equipo. Es gestionado por el servicio de informática
Informes	Elaboración de informes	Es el otro proceso esencial del servicio. Consiste en la elaboración de informes de las pruebas realizadas. Es realizado por los médicos radiólogos.
Resultado	Inclusión de las imágenes e informe en la historia clínica del paciente	El final del proceso. Está relacionado con el proceso de gestión de la historia clínica del paciente. Incluye información sobre el prescriptor, imágenes obtenidas e informe.

Tabla 9. Subprocesos del Servicio de Diagnóstico por Imagen

Se selecciona para este trabajo el proceso de realización de una prueba en un equipo de resonancia magnética.

4.1.1.2 Análisis del entorno y de los recursos del proceso

El servicio de diagnóstico por imagen desarrolla casi toda su actividad en la planta semisótano del hospital, la cual es accesible por las vías de comunicación internas del edificio como escaleras y ascensores y a través de dos puertas que dan al exterior. La accesibilidad desde el exterior a estos servicios es importante, ya que atienden en su mayor parte a pacientes que no requieren de ninguna otra interacción con otros procesos intrahospitalarios. Esto facilita la organización del flujo de personas dentro de ese espacio [138].

Esta configuración presenta otras ventajas adicionales dado que muchos de los procesos desarrollados en este servicio requieren poca luz o por requerimientos de infraestructuras para soportar el peso de determinado equipamiento. La luz natural suele reservarse para otros servicios, como hospitalización [139]. Casi todos los equipos de diagnóstico por imagen requieren de salas sin ventanas. En las salas de equipos que emiten rayos, como TAC, mamógrafos o telemandos son necesarios tabiques plomados sin ventanas [140]. En salas de ecografía, la propia imagen del equipo necesita una luz tenue que es incompatible con la luz exterior. Las resonancias magnéticas requieren de una jaula de Faraday para evitar las interferencias de las radiofrecuencias exteriores. Las salas de informe de los radiólogos necesitan un bajo nivel de luminosidad para poder observar el contraste de grises de las imágenes analizadas.

Muchos de los equipos de diagnóstico por imagen son fijos y con pesos elevados, por lo que la estructura del edificio debe estar preparada para soportarlos. Una forma sencilla de solucionar esta restricción es ubicar los equipos sobre el terreno para no tener que reforzar forjados con modificaciones estructurales.

En cuanto a los recursos humanos que forman parte de los procesos del servicio de diagnóstico por imagen se pueden distinguir entre trabajadores propios y personal de apoyo gestionados por otros departamentos. El personal propio del servicio está formado una supervisora como responsable, 4 administrativos que realizan tareas de apoyo, 30 médicos radiólogos encargados de informar las imágenes adquiridas por los equipos, 26 técnicos especialistas en radiodiagnóstico o TER, que realizan las pruebas (excepto ultrasonidos) y 4 enfermeras que dan apoyo clínico en los procedimientos que lo requieren [141].

El personal de apoyo en el proceso de diagnóstico por imagen se compone de celadores (desplazamiento de pacientes), personas que atienden los mostradores (proceso de consultas), limpiadores (departamento de servicios generales), mantenimiento (departamento de ingeniería) y médicos anestesistas que intervienen en las pruebas con sedación [142].

En la tabla 10 se describe el equipamiento electromédico que el servicio dispone para realizar sus funciones. Son equipos de adquisición de imágenes, que utilizan diferentes tecnologías para cumplir su cometido, como rayos, resonancia magnética o ultrasonidos [143].

Tipo	Ud	Características
Resonancia magnética	3	Los equipos disponen de un imán de 1,5 Teslas de intensidad magnética con una antigüedad entre 1 y 9 años.
TAC o escáner	1	Es un equipo de 160 cortes, con *software* y protocolos programados para el diagnóstico cardiológico y neurológico
Mamografía	1	Equipo digital para el diagnóstico de la mama
Radiología convencional	1	Equipo digitalizado mediante el uso de flat panel para la realización de placas o radiografías
Telemando	1	Equipo digital para la realización de pruebas con escopia. Tiene aplicación en digestivo, urología y ginecología entre otros. También permite hacer placas como un equipo convencional
Ecógrafos	5	Equipo de ultrasonidos. Debe ser manejado en tiempo real por el radiólogo, ya que la exploración no puede ser programada por protocolos como ocurre en el resto de equipos
Densitómetro	1	Equipo de rayos x, para la medición de la densidad ósea. Compara con valores de referencia

Tabla 10. Equipamiento Servicio de Diagnóstico por Imagen de HM Montepríncipe

Además de los equipos anteriores, son necesarios otros de apoyo como inyectores de contraste, monitores de constantes vitales, pulsioxímetros, tensiómetros, mesas de anestesia, carros de parada para emergencias, desfibriladores, rotámetros, etc.

El equipo usado en este estudio es el de resonancia magnética, el cual tiene unas características muy particulares que lo diferencian del resto como es el tiempo de adquisición de imágenes, el reducido espacio en el que debe permanecer el paciente durante el estudio o el nivel sonoro que se produce en la sala de exploración. Es el único equipo junto con los de ecografía en el que el tiempo de adquisición de imágenes es superior a unos segundos. Cada prueba requiere de un tiempo entre 20-40 minutos de media, que unido al espacio reducido en el que se realiza la prueba y que la persona debe permanecer inmóvil hasta el final, hace que el proceso pueda acumular ineficiencias tanto por los recursos que intervienen en el proceso como por el propio paciente.

4.1.1.3 Demanda y takt time

La demanda de un proyecto *Lean* hace referencia al número de unidades producidas dividido por la unidad de tiempo. Particularizado para el proceso de realización de una resonancia magnética esta medida da lugar a un resultado poco intuitivo, ya que se tendría que hablar una demanda de 1,46 pruebas/hora. Lo que se plantea entonces como unidad de medida es el inverso de la demanda o *Takt Time*, es decir, el tiempo que se tarda en realizar una prueba. Continuando con el dato anterior se diría que se necesitan en media 41 minutos para su realización.

$$\frac{1}{D} = TT = \frac{41\ min}{prueba} = \frac{1}{\frac{1{,}46\ pruebas}{hora}} \qquad (5)$$

A diferencia de otros equipos de diagnóstico por imagen que obtienen los resultados de forma muy rápida, una resonancia magnética necesita un tiempo mayor de preparación de antenas, paciente, etc. Estas pruebas comparativamente tienen un *Takt Time* más elevado.

En la tabla 11 se define la demanda y *Takt Time* de este proyecto y se indica su valor de referencia. Este cálculo es posible realizarlo porque la demanda del paciente coincide con la capacidad máxima de producción del proceso. Si no fuera así, el *Takt Time* vendría dado como el inverso de la demanda de cliente, el cual es un dato externo al procedimiento.

Concepto	**Tipo**	**Descripción**
Demanda	**Elem. procesado**	Paciente que requiere una prueba de resonancia magnética
	Definición	Número de pacientes a los que se les hace una prueba de resonancia magnética por unidad de tiempo
	Unidades	pacientes/hora. Se usan horas para adecuar la escala a valores cercanos a 1
	Valor referencia	1,46 pacientes/hora
Takt Time	**Elem. procesado**	Paciente que requiere una prueba de resonancia magnética
	Definición	Tiempo medio de realización de una prueba de resonancia magnética a un paciente
	Unidades	min/paciente. Se usan los minutos como unidad de tiempo por resultar más representativo que en horas.
	Valor referencia	41 min/paciente

Tabla 11. Definición del *Takt Time*

El valor de referencia del *Takt Time* se calcula como suma de los tiempos medios parciales de las tareas que forman parte del proceso.

La demanda se puede obtener como el inverso del *Takt Time*, ya que la holgura es cero y no hay tiempo de parada de la máquina, es decir, funciona en el punto máximo de producción.

4.1.2 Situación inicial

En este apartado se analizan en detalle las tareas que forman parte del proceso de realización de una prueba de resonancia magnética. Se usan dos herramientas proporcionadas por la metodología *Lean*: el diagrama de flujo de valor (VSM) y el *espagueti chart* [144].

4.1.2.1 Diagrama de flujo de valor (VSM)

El elemento procesado es la persona a la que se le realiza prueba, la cual va pasando por distintos estados que van añadiendo valor [145]. El estado inicial es el sujeto sin datos radiológicos y el estado final es la persona con información para diagnóstico. En la figura 8 se representa VSM. Además de las acciones y sus precedencias se ha dibujado al lado de cada tarea las ineficiencias identificadas y su *Takt Time* parcial.

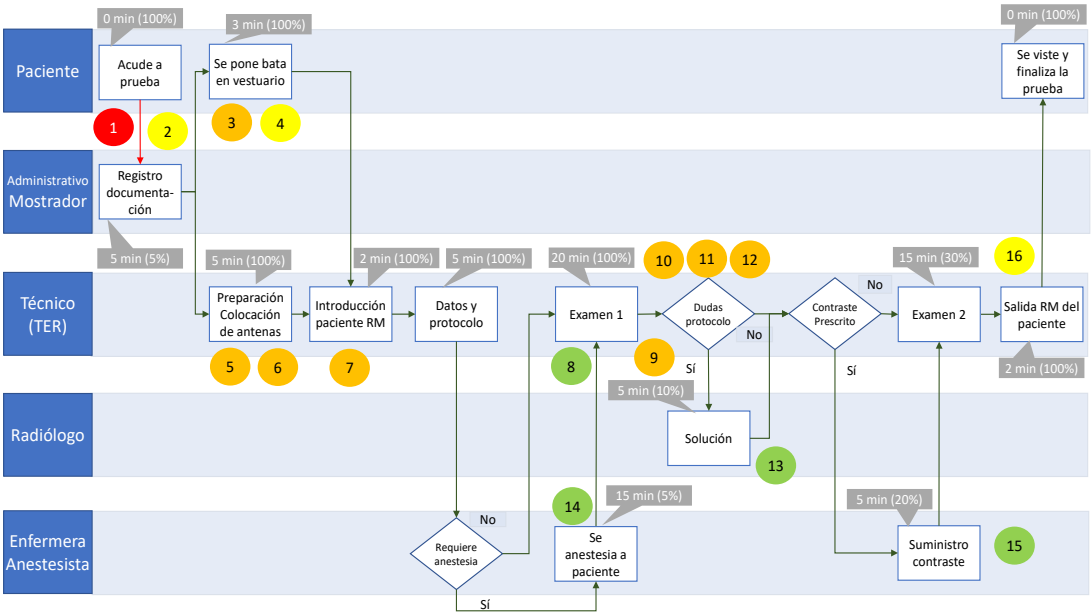


Figura 8. VSM del proceso de resonancia magnética. Fuente propia

La asignación de *Takt Time* parciales se ha realizado a través de la observación en el *Gemba*, entrevistas con los realizadores de las tareas, análisis de los informes de operación del servicio y la revisión de los protocolos programados en la resonancia magnética.

Todos los tiempos asignados son valores medios o estimados, ya que existe cierta variabilidad en el tiempo de duración de la prueba según las condiciones particulares en la que esta se realiza. Como método de validación del resultado se comprobó que coincidía con el número de estudios realizados mensuales en el horario de uso del equipo.

En la tabla 12 se muestran los cálculos para obtener el *Takt Time*.

Realizador	Acción	t (min)	Ocurrencia	t medio (min)
Paciente	Acude a prueba	0	100%	0
Ad. Mostrador	Registro documentación	5	5%	0,25
Paciente	Se pone bata en vestuario	3	100%	0
Técnico (TER)	Colocación de antenas	5	100%	5
Técnico (TER)	Introducción del paciente	2	100%	2
Técnico (TER)	Datos paciente y selección protoc.	5	100%	5
Anestesista	Se anestesia a paciente	15	5%	0,75
Técnico (TER)	Examen 1	20	100%	20
Radiólogo	Solución a dudas protocolo	5	10%	0,5
Enfermera	Suministro de contraste	5	20%	1
Técnico (TER)	Examen 2	15	30%	4,5
Técnico (TER)	Salida del paciente de la RM	2	100%	2
Paciente	Se viste y finaliza la prueba	0	100%	0
Takt Time				**41**

Tabla 12. Cálculo del *Takt Time*

En las tareas "se pone bata en vestuario" y "colocación de antenas", al producirse en paralelo, se elige el tiempo máximo de realización de ambas. Las tareas denominadas examen 1 y 2, con una duración de 20 min y 15 min (30% de ocurrencia) respectivamente no tienen ineficiencias identificadas. Estos son los tiempos propios de realización de la prueba, es decir, están sujetos al diseño del equipo. Cualquier mejora pasa por una actuación externa no programada desde el hospital.

Existen actualizaciones del *software*, realizadas por el fabricante, que permiten obtener mejores imágenes, reducción de tiempos o realización de nuevos estudios. Estas mejoras suelen producirse con frecuencia anual. Por otro lado, al final de la vida útil del equipo se puede plantear una actualización de todo el *hardware*, entendido como el cambio de la mayor parte de la resonancia, excluidos los elementos arquitectónicos y de las instalaciones específicas como son los blindajes, jaula de Faraday o *quench*. En este último caso, habría que considerarlo como una nueva instalación [146].

Las actualizaciones del *software* y *hardware* tienen un impacto económico elevado y no forman parte de este trabajo, por lo que la optimización de *Takt Time* tiene como cota inferior el tiempo que la máquina necesita para obtener las imágenes. El resto del tiempo, hasta llegar a los 41 min de *Takt Time* se corresponde con las acciones llevadas por los recursos humanos que forman parte del proceso. Este es el tiempo sobre el que se actúa para optimizar el proceso. El análisis y causas de ineficiencias se realiza en apartados posteriores.

4.1.2.2 Espagueti chart del proceso de resonancia magnética

De forma complementaria al VSM se usó la herramienta del *espagueti chart* para identificar ineficiencias asociadas al movimiento de los técnicos de resonancia magnética en el entorno de trabajo. Se realizaron varios registros de seguimiento en diferentes días.

En el siguiente plano se representa con una línea el movimiento del TER a lo largo de su turno.

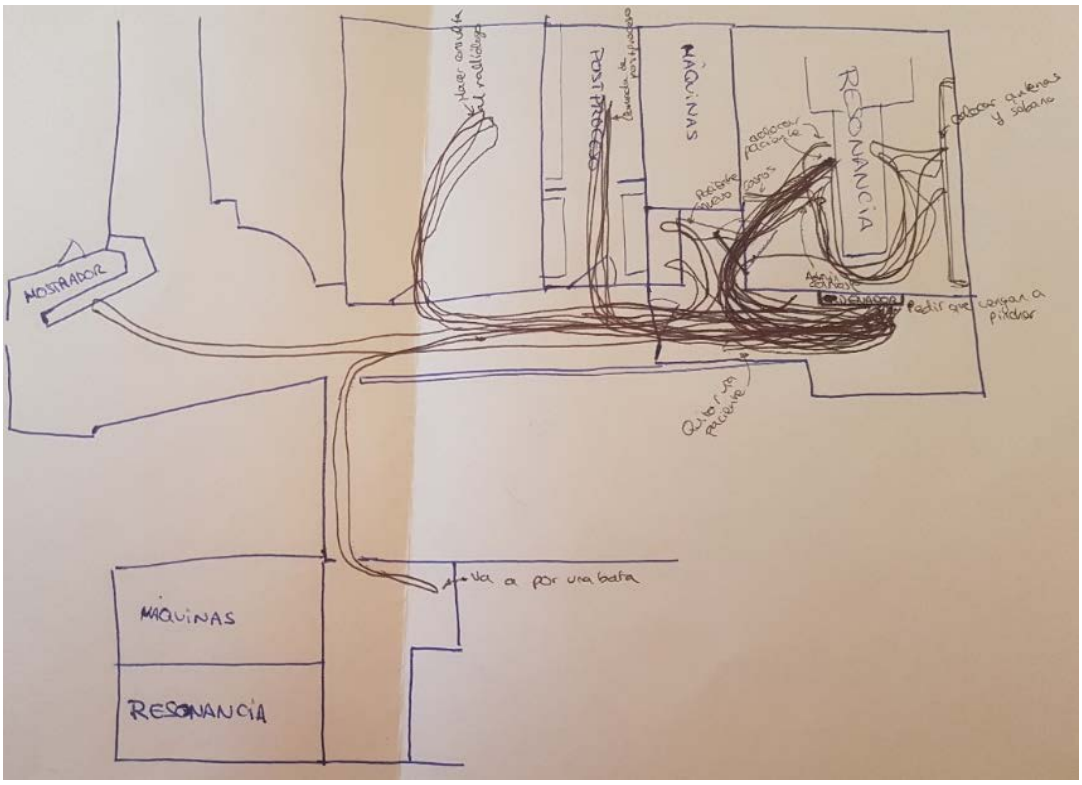


Figura 9. *Espagueti chart*. Fuente propia

Cada desplazamiento queda registrado con un trazo de manera que se puede observar cada lugar por donde ha pasado, así como la frecuencia.

Se comprobó que el técnico realiza la mayor parte de sus movimientos en la sala del operador del equipo, pero que también requiere hacer salidas para buscar material (batas), documentación al mostrador o búsqueda de personas (radiólogos).

Se han identificado varias razones para realizar estos traslados. Hay desplazamientos que están provocados por la falta de información y es necesario acudir a otro lugar para completarla, otros se deben a la falta de material y, por último, se tienen los movimientos de colocación del paciente, antenas o material que son propios de la función que realizan los técnicos.

4.1.3 Análisis de ineficiencias

En este apartado se analizan las causas de las ineficiencias encontradas en el proceso. Queda relacionado con el diagrama de flujo de valor (VSM) a través del código numérico y de color. Lo resultados de este apartado se usan posteriormente para proponer soluciones.

La identificación de desperdicios se apoya en el diagrama de flujo del proceso y la información recogida en el *Gemba*. Para ello, se analizan las tareas de forma individual y se investiga el valor añadido que aportan realmente al resultado, con independencia del diseño inicial o de las adaptaciones posteriores que haya tenido el procedimiento.

En la tabla 13 se describe cada ineficiencia y las posibles causas que las producen.

Código	Inefic/Causa	Descripción
1	**Ineficiencia**	**El paciente llega tarde a la prueba o no se presenta**
	Causa	Para esta ineficiencia las causas pueden ser múltiples, sobre todo las que tienen su origen en cuestiones personales del paciente. Desde el punto de vista del hospital es posible que no se haya transmitido adecuadamente la importancia de la asistencia o la puntualidad
2	**Ineficiencia**	**El paciente no trae relleno el consentimiento informado**
	Causa	Falta de información. No se explicó con claridad que es un documento imprescindible para la realización de la prueba
3	**Ineficiencia**	**El paciente (sobre todo niños) se asusta por el ruido de la máquina cuando se encuentra en el vestuario o a la espera de ser conducido al interior de la sala de exploración**
	Causa	Los equipos de resonancia magnética producen un nivel sonoro en la sala de exploración por encima de 100 db. El ruido percibido en el exterior depende de la insonorización de la sala y de la puerta
4	**Ineficiencia**	**Faltan batas para el paciente**
	Causa	No se revisa el stock de batas con la suficiente frecuencia
5	**Ineficiencia**	**Tiempos perdidos en el cambio de antenas según prueba**
	Causa	Las antenas tienen diferentes pesos y formas y se almacenan en lugares distintos, por lo que la colocación de una específica en el equipo de resonancia implica un tiempo y esfuerzo por parte del TER. La citación de pruebas no contempla la agrupación de pacientes con el mismo tipo de pruebas, por lo que cada paciente requiere de una configuración específica
6	**Ineficiencia**	**En el volante de prescripción no se indica correctamente la prueba o se describe genéricamente, generando dudas de los protocolos que se deben usar**
	Causa	El prescriptor no ha utilizado la denominación estándar de la prueba o la ha descrito de forma incompleta o incluso de forma incorrecta

Código	Inefic/Causa	Descripción
7	**Ineficiencia**	**El paciente se estresa por las dimensiones reducidas del *gantry* (o tubo de la resonancia) o tiene claustrofobia**
	Causa	Las dimensiones de la máquina dependen del modelo y diseño inicial, pero en general son reducidos en las resonancias cerradas. Al paciente se le debe informar de las dimensiones del equipo y explicar cómo se realizará la prueba, poniendo especial énfasis en el posible paciente claustrofóbico.
8	**Ineficiencia**	**El paciente se asusta por el ruido o no soporta ruido**
	Causa	El ruido del equipo dentro de la sala de exploración es bastante elevado y no se puede eliminar. Es posible que no se haya informado al paciente, o no se le hayan entregado los equipos de disminución del ruido (tapones o cascos) o estén mal colocados
9	**Ineficiencia**	**El paciente se mueve o quiere salir**
	Causa	La prueba de resonancia requiere que el paciente se quede inmóvil. No se ha informado claramente que si se mueve o se interrumpe la prueba, hay que repetirla, alargándola todavía más
10	**Ineficiencia**	**Protocolos no estandarizados, duplicados o similares**
	Causa	Muchos de protocolos han sido definidos por los propios radiólogos del servicio, hechos a su medida o basados en su experiencia. El TER tiene dudas de aplicación de protocolo más adecuado, ya que tiene varias alternativas similares
11	**Ineficiencia**	**Protocolos sin descripción clara**
	Causa	Existen protocolos que no están descritos de forma precisa, ya que se han definido de manera incompleta
12	**Ineficiencia**	**Protocolos con más secuencias de las necesarias**
	Causa	No existen suficientes protocolos específicos para las pruebas prescritas, por lo que es necesario usar otros con más secuencias
13	**Ineficiencia**	**Disponibilidad del radiólogo**
	Causa	El radiólogo no está en su sitio o no ha sido informado previamente que podía ser requerida su presencia
14	**Ineficiencia**	**Disponibilidad del anestesista**
	Causa	El anestesista no ha sido informado o ha tenido que asistir a una urgencia
15	**Ineficiencia**	**Disponibilidad de la enfermera**
	Causa	La enfermera no ha sido informada o se encuentra realizando otra acción
16	**Ineficiencia**	**El paciente tarda tiempo en salir**
	Causa	La prueba ha causado en el paciente mareo, lentitud o aturdimiento

Tabla 13. Análisis de ineficiencias

Las 16 ineficiencias expuestas en la tabla anterior se pueden agrupar en cuatro tipos:

Relativas al paciente (1, 2, 3, 7, 8, 9, 16): El paciente es uno de los elementos sensibles en el proceso, ya que a diferencia de otros entornos industriales, el elemento tratado son personas y por lo tanto, pueden tener comportamientos variables.

Por diseño y funcionamiento, un equipo de resonancia magnética requiere de un tiempo largo de adquisición de las imágenes, además de ser necesario mantener una posición inmóvil dentro de la máquina. Esto causa en el paciente cansancio durante la prueba y posible aturdimiento o mareo o malestar al finalizar (9,16). El proceso de adquisición de imágenes genera una gran cantidad de ruido (3,8), lo cual aumenta las molestias de la prueba en personas más sensibles al nivel sonoro. La camilla sobre la que se coloca al paciente es introducida en un cilindro de reducidas dimensiones en las que el paciente puede sentir claustrofobia (7). Otra de las fuentes de desperdicios es la falta de puntualidad del paciente y el retraso en la tramitación de la documentación al llegar (1,2).

Adicionalmente dentro de estas salas la temperatura suele ser baja (unos 20ºC) con fin de disipar el calor de determinados componentes del equipo, que unido a la poca ropa que lleva el paciente (generalmente una bata) y que debe permanecer solo dentro de la sala, acaban convirtiendo esta prueba en una situación de estrés, que dependiendo del tipo de paciente puede ser tolerable o inaceptable [147].

Por lo tanto, el origen de estas ineficiencias se encuentra en el comportamiento del paciente ante una situación de estrés que no es posible modificar debido al diseño del equipo y sus principios de funcionamiento.

Relativas a la programación de prueba (5, 6): Estas ineficiencias hacen referencia a la programación de la prueba diagnóstica, las cuales tienen un impacto directo en la preparación de la sala por parte de los técnicos.

El primer problema que se encuentran es que no queda claramente especificado el estudio a realizar (6), por lo que es necesario preguntar o buscar información adicional, es decir, falta estandarización de la nomenclatura en el momento del registro. Una de las fuentes habituales de desperdicios en los procesos es la falta de homogeneidad debido a una estandarización insuficiente.

La segunda causa está en el control del flujo del elemento procesado (5). En este sentido *Lean* cuenta con herramientas como el *SMED*, *Poka-Yoke o Lay Out*, u organización por células de trabajo para facilitar la nivelación de la producción.

Estos desperdicios se producen por falta de estandarización en el proceso debido a un diseño incorrecto inicial o a modificaciones posteriores que se no se han integrado adecuadamente.

Relativas al protocolo o secuencias (10, 11, 12): Estos desperdicios están relacionados con los protocolos usados para hacer los estudios, es decir, son acciones programadas en la máquina que se ejecutan siempre de la misma manera para obtener un tipo concreto de imágenes. Una secuencia en una resonancia es una acción realizada por la máquina para adquirir las imágenes esperadas según una antena predeterminada. Un protocolo aúna varias secuencias para dar respuesta a la petición de imágenes solicitada por el prescriptor. La configuración inicial de protocolos se realiza en el momento de instalación, pero a medida que va pasando el tiempo es habitual que se definan nuevas combinaciones de secuencias.

El problema que surge es que los protocolos disponibles en el momento para realizar la prueba pueden no estar perfectamente alineados con la necesidad de adquisición de imágenes. Puede ocurrir que el protocolo tenga más secuencias de las necesarias (12), que existan protocolos similares o duplicados (10), no bien identificados (11) o que sea necesario usar varios protocolos complementarios, con secuencias no solicitadas.

La definición de nuevos protocolos se realiza para resolver una necesidad puntual o para adaptarlo a una forma de trabajo específica de alguno de los recursos humanos. La definición *ad hoc* de secuencias, sin tener en cuenta la globalidad del procedimiento y de la información previa guardada en el equipo, hace que se aleje de la configuración de origen, que se supone que estaba optimizada.

Relativas a la disponibilidad de los recursos asistenciales (13, 14, 15): Estas ineficiencias pueden ser de tipo organizativo o de coordinación de personas o por dimensionamiento insuficiente del personal. Afectan al flujo de trabajo interrumpiéndolo y retrasando la prueba. El origen de estos desperdicios se encuentra en la disponibilidad de determinado un recurso asistencial en un momento puntual (13,14,15). Sin embargo, el problema no se encuentra en la persona sino en la competencia en la entran diferentes procesos por el uso del mismo recurso de forma simultánea. Es una ineficiencia del sistema y de sus interacciones entre procedimientos.

Este desperdicio se debe a la falta de coordinación y/o de recursos. Para el primer caso se han analizado los procedimientos de otras áreas un tratar el problema de comunicación o planificación de forma conjunta. Para el segundo caso se han analizado el número de personas disponibles para las diferentes categorías, pero no ha sido posible obtener conclusiones definitivas por ser necesario realizar un análisis más profundo de las NVA del resto de procesos.

4.1.4 Situación propuesta

Se proponen soluciones para corregir o minimizar los desperdicios identificados en el análisis previo. En primer lugar, se construye la matriz de impacto-accesibilidad (IA) con el fin de clasificar las ineficiencias por su relevancia. Para ello, se puntúa, en una escala del 1 al 6 cada desperdicio según dos criterios: accesibilidad de la solución e impacto en el resultado. La matriz IA se construye representando cada par de valores en coordenadas cartesianas. Se denomina matriz porque se divide en 4 cuadrantes, que determinan la prioridad de actuación. Para construir la matriz no es necesario conocer las soluciones en detalle. Al ser una primera aproximación, se pueden cambiar los datos posteriormente para ajustarlo al resultado final.

A continuación, se plantean en detalle las soluciones, teniendo en cuenta las prioridades establecidas en la matriz IA. Una solución puede resolver varias ineficiencias a la vez. También puede darse el caso que una de ellas requiera de dos soluciones de forma simultánea. En este apartado se realizan propuestas sin entrar en el detalle de implantación, el cual se analiza en el plan de acción.

Por último, se lleva a cabo el análisis cuantitativo. Se realiza una estimación de la reducción de *Takt Time* (ΔTT) que producen las soluciones. Los ahorros conseguidos por ΔTT se comparan con los costes asociados a cada propuesta. Mediante un análisis de VAN y TIR se calcula la rentabilidad, el *payback* o tiempo en que se recupera la inversión a través de los ahorros.

4.1.4.1 Análisis cualitativo

En la tabla 14 se presentan las puntuaciones asignadas a cada solución para su representación en la matriz de impacto-accesibilidad (IA).

Inef.	Descripción	I	A
1	El paciente llega tarde a la prueba o no se presenta	3	2
2	El paciente no trae relleno el consentimiento informado	3	5
3	El paciente se asusta por el ruido de la máquina	4	2
4	Faltan batas para el paciente	2	6
5	Tiempos perdidos en el cambio de antenas según tipo de prueba	6	2
6	En el volante de prescripción no indica correctamente la prueba	5	2
7	El paciente se estresa por las dimensiones reducidas del gantry	4	1
8	El paciente se asusta por el ruido o no soporta ruido	4	4
9	El paciente se mueve o quiere salir	4	2
10	Protocolos no estandarizados, duplicados o similares	6	3
11	Protocolos sin descripción clara	6	3
12	Protocolos con más secuencias de las necesarias	6	3
13	Disponibilidad del radiólogo	6	4
14	Disponibilidad del anestesista	5	4
15	Disponibilidad de la enfermera	5	5
16	El paciente tarda tiempo en salir	2	5

Tabla 14. Puntuaciones de las ineficiencias para la matriz IA

En la figura 10 se representan las coordenadas (I,A) de la tabla 12. La matriz queda dividida en 36 casillas, es decir, 9 casillas por cuadrante. Aquellas ineficiencias que obtienen la misma puntuación se representan en la misma casilla, por lo que resultan totalmente equivalentes a efectos de priorización.

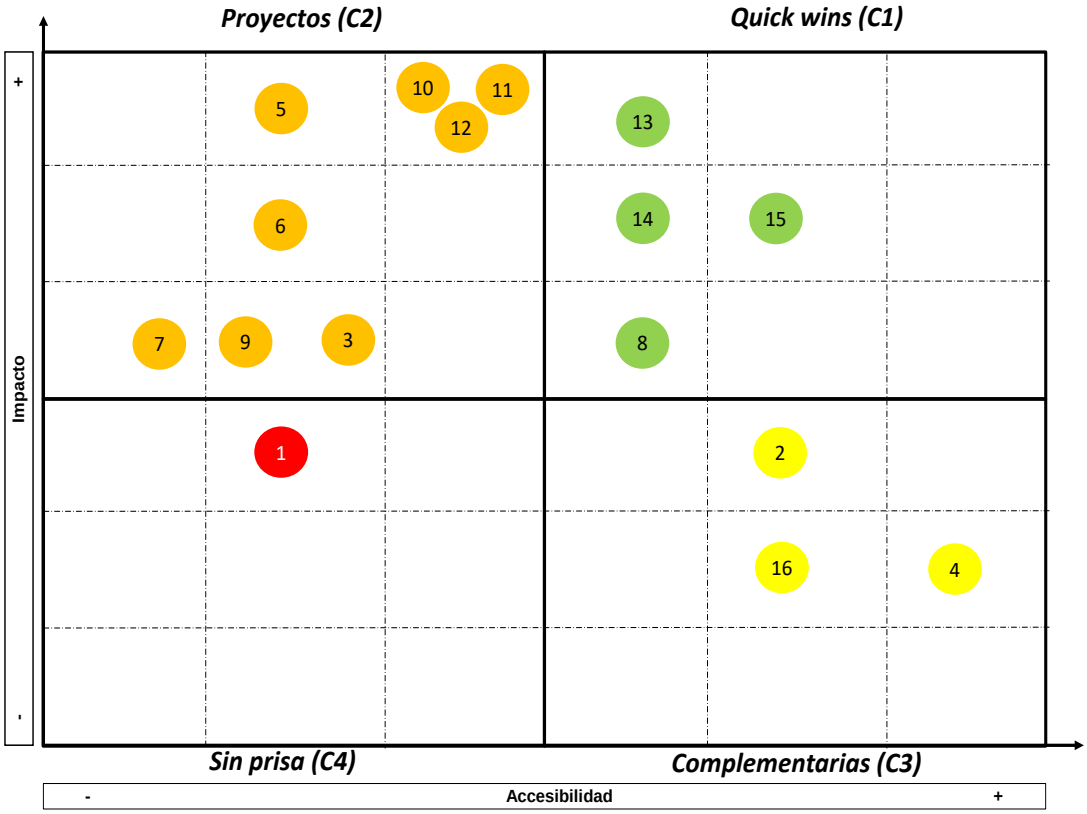


Figura 10. Matriz de impacto accesibilidad. Fuente propia

En el cuadrante 1 (C1) se han representado las ineficiencias de tipo organizativo (13; 14 ;15). También se ha incluido la número 8, ruido que percibe el paciente. Tienen un alto impacto en el proceso y no parecen difíciles de implementar. Es lo que se conoce como *Quick Wins*. Deberían ser las primeras a realizar.

En el cuadrante 2 (C2) los desperdicios detectados hacen referencia a tres tipos de problemas: programación o citación de pruebas (5; 6), definición de protocolos (10; 11; 12) e información para el paciente (3; 7; 9). Tienen alto impacto como las de C1, pero con mayor dificultad de realización. Las soluciones que se planteadas seguramente requieran de proyectos individuales para su ejecución.

En el cuadrante 3 (C3) se han dibujado ineficiencias asociadas a la comunicación con el paciente (2; 16) o al control del inventario (4). Son fáciles de llevar a cabo, pero no tienen una gran relevancia.

En cuadrante 4 (C4) aparece una única ineficiencia que hace referencia al comportamiento del paciente (1). Es complicada su solución y no resulta relevante.

Tras el análisis previo de la matriz IA se proponen las soluciones mostradas en la tabla 15.

Sol.	Inef.	I	A	Descripción de la solución
S1	5	6	2	**Cambios en la estructura de clasificación de pruebas** Especificación de tipología. Algoritmo de optimización para minimizar los cambios de antenas
	6	5	2	
S2	10	6	3	**Armonización de protocolos y secuencias** Eliminación de duplicados, obsoletos o sin descripción. Eliminación de secuencias innecesarias
	11	6	3	
	12	6	3	
S3	13	6	4	**Coordinación de recursos humanos y planificación trabajo** Nuevos protocolos de actuación. Programación compartida de cada prueba para cada parte interesada
	14	5	4	
	15	5	5	
S4	7	4	1	**Información al paciente y formación del personal técnico** Información adecuada al paciente sobre el tipo de prueba. Formación de los TER para que tengan herramientas interpersonales y puedan ayudar a calmar, acompañar y guiar a los pacientes más sensibles a esta prueba
	9	4	2	
	3	4	2	
S5	3	4	4	**Actuación sobre el ruido** Reducción ruido en exterior mejorando aislamiento acústico. Equipos individuales (*active noise control*) dentro de la sala
	8	5	2	
S6	1	3	2	**Mejora de la comunicación con el paciente** Mensaje estandarizado Foco en determinados mensajes clave. Refuerzo en grupos de pacientes especialmente sensibles
	2	3	5	
S7	2	3	5	**Adelanto en la citación del paciente** Entrega consentimiento informado
S8	16	2	5	**Acompañamiento al paciente** Detección de necesidades o circunstancias especiales
S9	4	2	6	**Control de inventario** Aplicación de la metodología de las 5S

Tabla 15. Soluciones propuestas a las ineficiencias

La solución S1 actúa sobre el programa de citación a través de estandarización y el desarrollo de un algoritmo de permita agrupar pruebas similares. La S2 hace referencia a la configuración de máquina. La S3 es de tipo organizativo para determinado personal que interviene a demanda en el proceso. La S5 se plantea para reducir el ruido que llega al paciente, ya que sobre la fuente principal no se puede actuar. Las soluciones S4, S6, S7 y S8 tratan de modificar, ayudar, controlar o guiar determinados comportamientos del paciente ante la prueba. La S9 actúa sobre el control de stocks.

A continuación, se discuten las soluciones, según la misma estructura de clasificación que se empleó en el apartado anterior de análisis de las ineficiencias.

Relativas al paciente (1, 2, 3, 7, 8, 9, 16)

Las ineficiencias relacionadas con el paciente son corregidas a través de las soluciones S4, S5, S6, S7 y S8.

La solución S5 es la única que actúa sobre elementos físicos del equipo, ya que propone mitigar el ruido que llega al paciente. Es este caso se pueden realizar mediciones para comprobar la efectividad de la solución. Sin embargo, la percepción del ruido por el paciente tiene un cierto grado de subjetividad, según la sensibilidad que este tenga a los sonidos fuertes. Se debe tener en cuenta que el ruido en sí mismo no es la ineficiencia sino la reacción que provoca en el paciente, aumentando su estrés y haciendo que actúe parando el flujo del proceso. La reducción de *Takt Time* puede ser relevante si se consigue disminuir la ansiedad del paciente debido a esta causa.

Las soluciones S4, S6 y S8 se basan en aportar información al paciente para que se familiarice con la prueba, esté tranquilo, se expliquen las consecuencias de no cumplir con las indicaciones o cualquier otra información que pueda requerir. Sin embargo, cada una de estas propuestas tiene objetivos y momentos de aplicación diferentes.

La S6 y S7 tratan de minimizar el impacto en el proceso de la falta de puntualidad del paciente y de los trámites administrativos que hay que realizar durante el registro en el mostrador. En este caso la causa no se debe a un estrés asociado a la prueba, sino que son otras de diversa índole. Actuar sobre ellas puede resultar complicado por lo que se opta por dos actuaciones complementarias. En la S6 se busca mejorar la información que se transmite al paciente. En un escenario conservador no se cuenta con una reducción del *Takt Time* debido a esta implementación. La S7 actúa sobre la hora de citación del paciente. Es una medida que afecta a todos por igual por lo que se mejorará el *Takt Time* en los casos que traían retraso y no tendrán efecto con los puntuales. Es necesario mantener un equilibrio entre mantener el flujo de proceso y hacer esperar al paciente, que en definitiva es tener un stock previo a la entrada del proceso. Se espera una reducción del *Takt Time* moderada.

La S4 tiene como objeto ayudar al paciente a controlar el estrés que producen determinadas características de la prueba como son duración, ruido, necesidad de permanecer inmóvil, estar solo, dimensiones reducidas del *gantry* (o interior de la máquina donde se desarrolla el estudio). Son medidas de aporte de información y de habilidades interpersonales de los técnicos (TER) hacia el paciente. En el momento de la prueba, el TER puede convertirse para el paciente en el único elemento cercano y de seguridad, por lo que esta solución se plantea usarlo como vehículo de transmisión de determinados mensajes que puedan ayudar a tranquilizarlo.

La S8 consiste en ayudar al paciente a realizar una salida de la máquina rápida y que a la vez se sienta acompañado. Es habitual que algunos pacientes sientan mareo o entumecimiento al final de prueba por haber estado inmóviles y tumbados tanto tiempo. La labor del TER es este caso es la ayudar a su incorporación y valorar si necesita algún tipo de ayuda. No se espera reducción de *Takt Time* en este caso. Su implantación revierte en una mayor satisfacción del paciente y la percepción de haber recibido un buen trato, sobre todo teniendo en cuenta que esta se produce al final de la prueba.

Relativas a la programación de prueba (5 ,6)

Las ineficiencias en la programación de los estudios se resuelven a través de la solución S1, la cual estandariza la nomenclatura de las pruebas y mejora el flujo del proceso a través de un algoritmo que minimiza el cambio de antenas en la resonancia.

Cada paciente requiere de una antena particular para el tipo de prueba que se le ha prescrito. A veces las antenas son voluminosas y pesadas, por lo que al minimizar sus movimientos se reducen los tiempos de cambio, así como el esfuerzo del técnico por cargar con ellas. Esta solución también minimiza las dudas sobre el tipo de prueba que se va a realizar, ya que los estudios se denominan de forma estándar.

El impacto en la reducción del *Takt Time* es de 1 minuto partiendo de una duración de 5 minutos, por lo que se consigue una optimización del -20%.

Relativas al protocolo o secuencias (10, 11, 12):

Al igual que el caso anterior estas ineficiencias se producen por falta de estandarización, salvo que en este caso se refiere a la programación de la máquina.

La solución S2 debe estar alineada con el tipo de prueba prescrita, por lo que debe tener la suficiente cercanía a la nomenclatura estándar definida con la solución S1 y flexibilidad para dar respuesta a las necesidades particulares que puedan surgir durante los estudios.

El alcance de esta solución solo contempla facilitar al técnico la selección del protocolo, sin embargo, podría ser mucho mayor si se tiene en cuenta el impacto que podría tener en el tiempo de adquisición de imágenes por el uso de las secuencias adecuadas y desechando aquellas no necesarias.

La solución S2 puede conseguir una reducción del *Takt Time* en la tarea de selección de protocolos de 2 minutos de un total de 5 minutos, es decir, se obtiene un -40%.

Relativas a la disponibilidad de los recursos asistenciales (13, 14, 15):

La solución S3 consiste en compartir la información sobre la demanda del recurso médico en la resonancia con los diferentes procesos que lo puedan requerir. Además de compartir la información se puede implementar un algoritmo de programación entre procesos, que incorpore como restricciones el uso que se ha solicitado del recurso en otros departamentos. Se ha estimado una reducción del *Takt Time* de 0,5 minutos.

Incorporando a la matriz de impacto accesibilidad las soluciones propuestas, se obtiene la figura 11, que resume el análisis cualitativo hasta el momento.

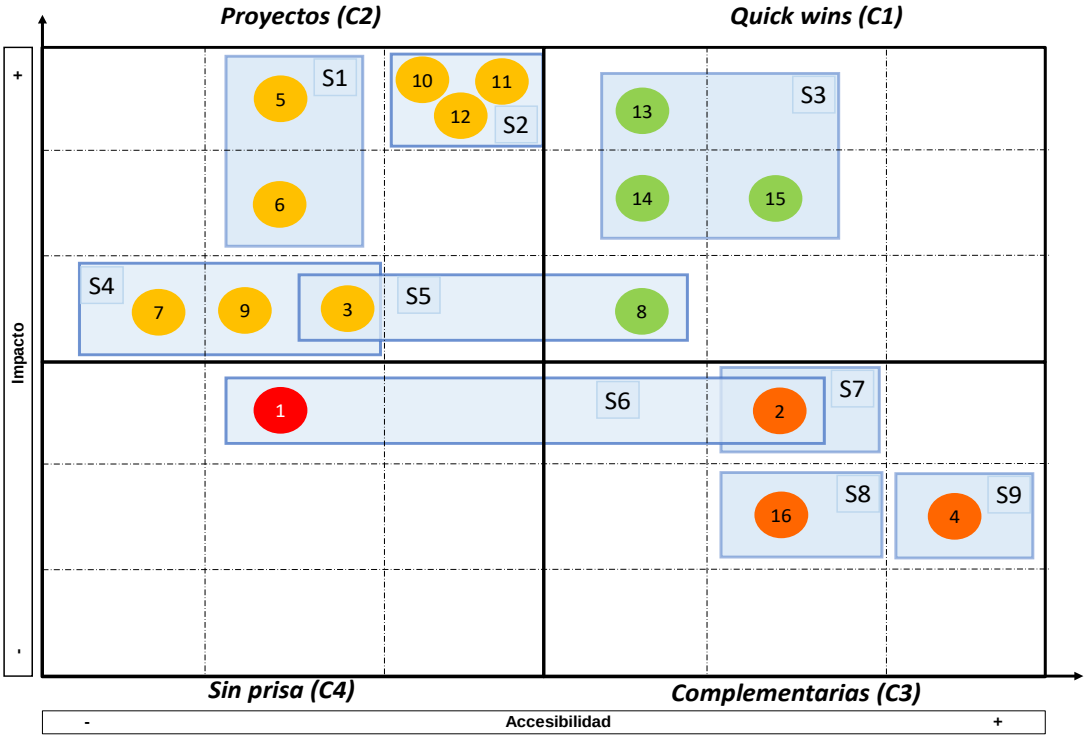


Figura 11. Matriz de impacto accesibilidad con soluciones. Fuente propia

Para la eliminación o reducción de las 16 ineficiencias identificadas se plantean 9 soluciones. Una de ellas tiene aplicación inmediata, ya que pertenece al cuadrante de *Quick Wins*. Otras cuatro deben ser implantadas a través de proyectos independientes con dotación de recursos propia y aplicación de gestión por proyectos con segundo nivel de prioridad. Las cuatro últimas son soluciones complementarias que entrañan poca dificultad, pero tienen poco impacto.

La mayoría de estas propuestas dan respuesta a más de una ineficiencia, ya que estas suelen nacer de problemas que tienen un origen común como la falta de estandarización, información, coordinación entre recursos, continuidad del flujo.

Esta matriz es la base para la realización del plan de acción, ya que marca las prioridades de implantación de las diferentes soluciones e indica el tipo de proyecto a realizar para lograr su objetivo.

4.1.4.2 Análisis cuantitativo

El análisis cuantitativo consiste en calcular la viabilidad de cada una de soluciones según el valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR) y tiempo de recuperación de la inversión o *Payback*.

En la tabla 16 se presenta resumen del análisis cuantitativo de las soluciones propuestas.

Solución	ΔTakt Time (min)	Ahorros por Δtt (€/mes)	Coste solución (€)	VAN 12 meses	TIR	*Payback* (meses)
S1	-1	4.467	-25.600	28.001	14%	6
S2	-2	8.933	-38.400	68.801	21%	4
S3	-0,5	2.233	-6.400	20.400	34%	3
S4	-0,9	4.020	-6.400	41.841	63%	2
S5	-0,5	2.233	-12.000	14.800	15%	5
S6	0	0	-6.400	NA	NA	NA
S7	-0,1	447	-2.400	2.960	15%	5
S8	0	0	-6.400	NA	NA	NA
S9	0	0	-4.000	NA	NA	NA
Todas	**-5**	**22.334**	**-108.000**	**160.004**	**18%**	**5**

Tabla 16. Análisis cuantitativo de las soluciones

En la tabla 17 se muestra la reducción del *Takt Time* y el tiempo final obtenido para cada tarea según la solución propuesta.

Realizador	Acción	t (min)	Ocu-rrencia	t med (min)	Δtt (min)	t fin	Solu-ción
Paciente	Acude a prueba	0	100%	0	0	0	
Ad. Mostrador	Registro documentación	5	5%	0,25	-0,1	4,9	S6;S7
Paciente	Se pone bata en vestuario	3	100%	0	0	0	S9
Técnico (TER)	Colocación antenas	5	100%	5	-1	4	S1
Técnico (TER)	Introducción paciente	2	100%	2	-0,4	1,6	S4
Técnico (TER)	Datos paciente/protocolo	5	100%	5	-2	3	S2
Anestesista	Se anestesia a paciente	15	5%	0,75	-0,25	0,5	S3
Técnico (TER)	Examen 1	20	100%	20	-1	19	S4;S5
Radiólogo	Solución dudas protocolo	5	10%	0,5	0	0,5	
Enfermera	Suministro de contraste	5	20%	1	-0,25	0,75	S3
Técnico (TER)	Examen 2	15	30%	4,5	0	4,5	
Técnico (TER)	Salida del paciente de RM	2	100%	2	0	2	S8
Paciente	Se viste. Finaliza prueba	0	100%	0	0	0	
Takt Time				**41**	**-5**	**36**	

Tabla 17. Cálculo del nuevo *Takt Time*

El nuevo *Takt Time* pasa de 41 minutos a 36 minutos.

Los ahorros por reducción de *Takt Time* en la tabla 14 se han calculado como producto del número de pruebas mensuales por el porcentaje de reducción de tiempo y por la facturación de la prueba. El coste de las soluciones viene definido por cada proyecto y su presupuesto de realización asociado. VAN, TIR y *Payback* son valores calculados.

Se observa que todas las soluciones que tienen reducción de *Takt Time*: S1, S2, S3, S4, S5 y S7 tienen valores de TIR comprendidos en el rango de [14%-63%], por lo que la inversión resulta rentable. De la misma manera se comprueba que el tiempo que se tarda en recuperar la inversión realizada es de 2 a 6 meses. La S4 es la solución mayor TIR 63% y menor tiempo de recuperación de la inversión (2 meses).

El coste de la inversión de cada solución varía en función de los recursos necesarios para su desarrollo y el tiempo de ejecución. El tipo de recurso planteado son horas de programación, consultoría y formación a excepción de la S5 que tiene costes de instalación.

Para valorar los ahorros producidos por cada solución se calcula el VAN de cada proyecto en un horizonte temporal de 12 meses, obteniendo cantidades positivas para todas las propuestas, por lo que se confirma que las inversiones son rentables. El VAN máximo se obtiene con la solución S2 con un valor de 68.801 €, frente al mínimo de la S7 y valor 2.920 €.

Las soluciones S6, S8 y S9 no tienen reducción de *Takt Time* o resulta prácticamente nulo. Son soluciones que contribuyen a mejorar la experiencia del paciente y calidad del servicio y por lo tanto deben ser tenidas en cuenta. Tienen impacto en el departamento de marketing o de satisfacción del paciente, pero no pueden ser cuantificado su efecto en este estudio, ya que se encuentra fuera de su alcance. Dado que no producen ahorros no aplica calcular TIR, VAN o *payback*. Sin embargo, los costes de implantación que deberán ser absorbidos por los ahorros de las otras soluciones.

Finalmente, si se considera el conjunto de todas las soluciones como un único proyecto se tiene que para conseguir una reducción de 5 minutos en el *Takt Time*, es necesario llevar a cabo 9 soluciones que darán lugar a unos ahorros mensuales de 22.334 €/mes y un coste de implantación de 108.000 €. El proyecto recupera la inversión en 5 meses a través de los ahorros generados, dando lugar a un beneficio de 160.004 € en 12 meses. La rentabilidad del conjunto de las soluciones tiene una TIR del 18%.

En la figura 12 se muestra el diagrama VSM de la situación propuesta.

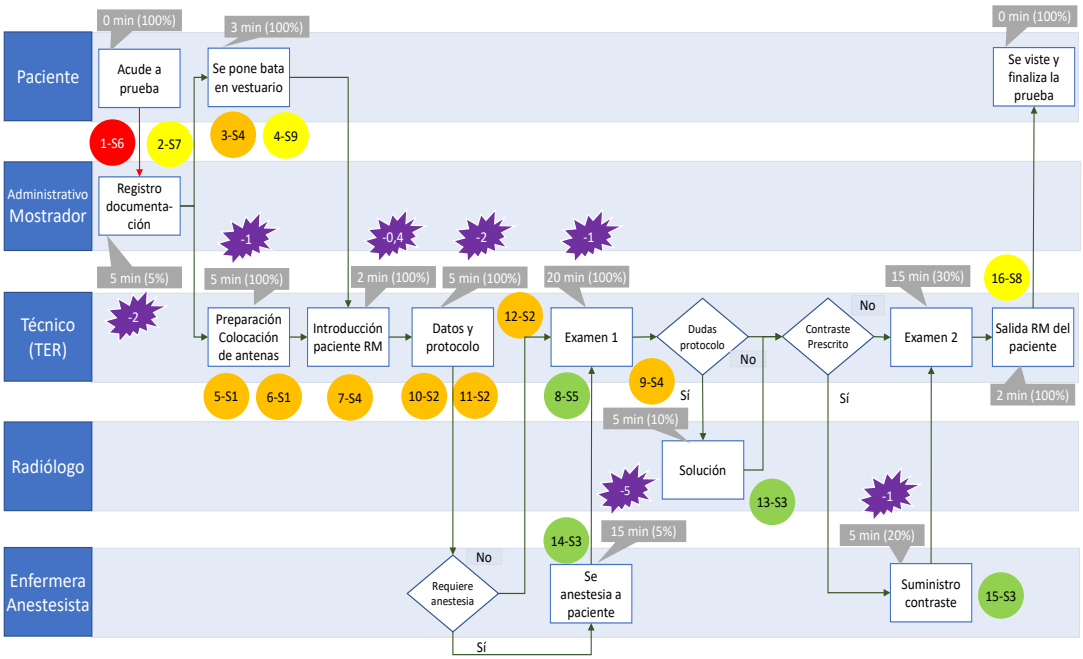


Figura 12. VSM de la solución propuesta. Fuente propia

Esta figura añade la información obtenida en el apartado de la situación propuesta al VSM inicial: número de la solución asociado a la ineficiencia y tiempo de reducción del *Takt Time* parcial. Se consiguen reducciones de *Takt Time* en 7 tareas, dando lugar a una disminución global de 5 minutos, lo que supone un del 12% del total. La mayor disminución de tiempo se produce en la selección del protocolo para realizar la prueba con -2 minutos. La reducción de -5 minutos en la anestesia tiene menos impacto por el porcentaje de ocurrencia. Esta mejora en el tiempo de realización de pruebas se puede traducir en la realización de más estudios en el mismo horario sin aumentar los costes.

Por otro lado, existen tareas que no han obtenido reducción de tiempo, pero que se han beneficiado de las soluciones aplicadas, aumentando la calidad del servicio y de los recursos humanos que trabajan en él, eliminando desperdicios y mejorando la satisfacción del paciente.

Se comprueba que el VSM de la nueva situación propuesta puede usarse como una herramienta visual de comunicación y de *feedback* para las diferentes partes. Incluye las soluciones aplicadas para resolver las ineficiencias halladas en el primer análisis y el *Takt Time* inicial y su valor reducido. También puede utilizarse como herramienta de seguimiento y de mejora para proyectos futuros en el servicio, ya que el proceso completo está identificado, así como las tareas que añaden valor.

4.1.5 Plan de acción

El plan de acción consiste en programar, asignar responsables y priorizar la realización de cada solución propuesta para dar respuesta a las ineficiencias detectadas en los análisis previos.

Existen diferentes formas de gestionar proyectos y cada solución exigirá una en función de la dificultad de implantación, especialización y disponibilidad de los recursos, si son propios o subcontratados, de la duración del proyecto, de la secuencia de realización, etc. Estas decisiones se deben tomar en esta fase para ofrecer una propuesta integrada.

La figura 13 representa el mapa de transformación del proyecto *Lean*.

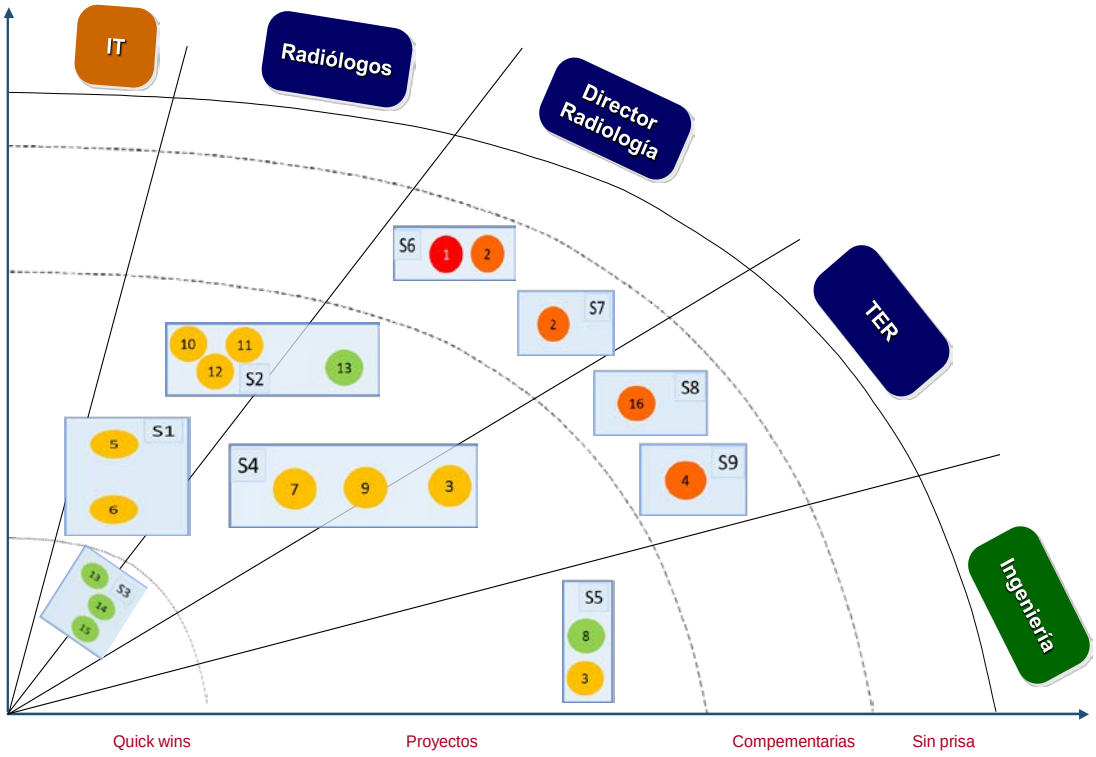


Figura 13. Mapa de transformación. Fuente propia

El mapa de transformación es un gráfico en el que la coordenada angular el establece el área responsable y la radial el tiempo, el cual está relacionado con los cuadrantes de la matriz de impacto-accesibilidad y por lo tanto con la priorización. En cuanto a los realizadores la mayoría de las soluciones deben ser llevadas a cabo por los diferentes perfiles del área de diagnóstico por imagen: director de radiología, radiólogos y TER. Los proyectos más cercanos al origen son los *Quick Wins*, que son aquellos que deben acometerse lo antes posible. En segundo lugar, se plantean los proyectos de alto impacto, pero que tienen una mayor dificultad. En la última fase de desarrollan las soluciones de menor impacto.

4.1.6 Herramienta A3

El A3 es el documento que resume todos los apartados anteriores en un solo documento. Contiene la información mínima para que cualquier persona pueda entender cuál es el planteamiento del proyecto qué soluciones se han propuesto, así como el plan de acción.

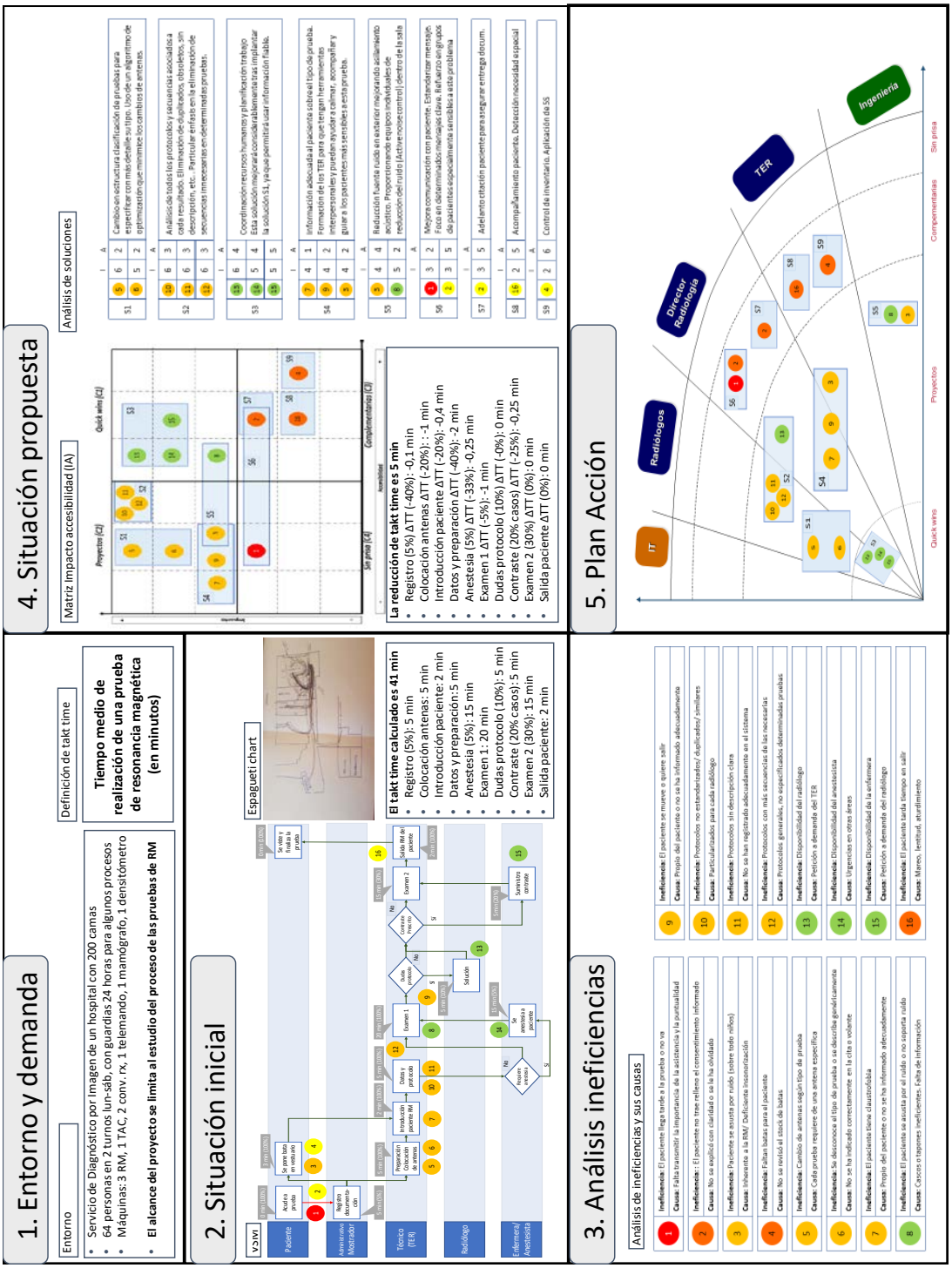


Figura 14. Resultado A3. Fuente propia

4.1.7 Implantación de las soluciones

En este apartado se describe el proceso de implantación de las distintas soluciones. En el momento de redacción de este trabajo se ha aprobado la realización de las soluciones S1, S2, S3, S4 y S5.

Para la implantación de cada iniciativa se ha usado la metodología de gestión de proyectos, la cual implica definir unos objetivos y un alcance, la duración global, fases que lo componen y los recursos necesarios. Se realiza el seguimiento del proyecto a través del estado actual y las principales dificultades encontradas. Por último, se valora si se ha conseguido la reducción del *Takt Time* previsto. Las tablas de la 18 a la 22 muestran el detalle de implantación de cada solución.

Proyecto	S1	Cambios en la estructura de clasificación de pruebas
Objetivos		El objeto es doble: estandarizar la denominación de cada prueba o nomenclátor y crear un algoritmo para agrupar pruebas de la misma tipología.
Alcance		Se aplica a todas las pruebas de resonancia magnética.
Duración		Duración estimada de 9 meses.
Fases		Consta de dos fases: F1: estandarización y F2: programación de pruebas.
F1	**F1.1**	Análisis del histórico de pruebas realizadas y comparación con estándares.
F1	**F1.2**	Elaboración del estándar.
F1	**F1.3**	Validación por personal experto.
F1	**F1.4**	Programación en sistema de citas.
F1	**F1.5**	Formación de las personas implicadas. Difusión libro de códigos.
F2	**F2.1**	Asociación de antenas a pruebas de estandarizadas.
F2	**F2.2**	Definición y programación del algoritmo.
F2	**F2.3**	Implantación y pruebas.
Recursos		Todos los recursos del proyecto son personas. Participan como responsables el jefe de servicio de diagnóstico por imagen y el jefe de desarrollos informáticos. Como expertos se cuenta con dos radiólogos y dos TER. El desarrollo informático lo realiza un programador. El diseño del algoritmo de optimación de uso de antenas se subcontrata a una empresa especializada.
Estado		*En el momento de redactar esta ficha han finalizado las fases F1.1, F1.2, F1.3. La fase F1.4 está en desarrollo. La fase F1.5 todavía no ha comenzado La fase F2.1 está desarrollo y comenzó al finalizar la F1.3. Se han producido las primeras reuniones con la empresa externa para definir el algoritmo.
Principales dificultades		La mayor dificultad que se está encontrando es manejar el gran volumen de pruebas y todas sus variantes. A pesar de contar con expertos, aparecen gran cantidad de dudas y casos límite. Otra de las preocupaciones proviene de los TER, que no confían en que la planificación en la colocación de antenas pueda ser gestionada mejor por un algoritmo que por ellos mismos.
Reducción *Takt Time*		Todavía no se ha podido comprobar.

Tabla 18. Ficha de gestión del proyecto de solución S1

Proyecto	S2	Armonización de protocolos y secuencias
Objetivos		El objetivo de este proyecto es analizar los protocolos de adquisición de imágenes con el fin de optimizarlos. Para ello se tratará de estandarizar, simplificar o eliminar aquellos protocolos que no sean necesarios (duplicados, incompletos).
Alcance		Se actúa sobre todos los protocolos definidos en cada resonancia magnética. Se estandarizan los protocolos entre diferentes máquinas.
Duración		Duración estimada 8 meses.
Fases		El proyecto consta de 8 tareas divididas en dos fases F1 análisis y F2 pruebas
F1	**F1.1**	Extracción de todos los protocolos.
F1	**F1.2**	Creación de herramienta de análisis para comparación.
F1	**F1.3**	Propuesta de protocolos realizada por el grupo de trabajo.
F1	**F1.4**	Validación por el equipo de radiólogos.
F2	**F2.1**	Implantación en uno de los equipos.
F2	**F2.2**	Revisión de los resultados.
F2	**F2.3**	Propuesta definitiva.
F2	**F2.4**	Implantación en el resto de equipos.
Recursos		Todos los recursos que participan son personas. Se formará un grupo de trabajo compuesto por el jefe del servicio de diagnóstico por imagen, 3 radiólogos y 2 técnicos especialistas en radiodiagnóstico (TER). Para cuestiones específicas de la configuración de los protocolos se contará de forma puntual con ingenieros y especialistas en aplicaciones de los equipos de las casas comerciales. En la fase de implantación participarán todos los radiólogos y técnicos especialistas en radiodiagnóstico del servicio de diagnóstico por imagen.
Estado		En el momento de redactar esta ficha ha finalizado la fase 1, con todas las subfases F1.1, F1.2, F1.3 y F1.4. La fase 2 se encuentra en realización. La subfase F2.1 es la única que se encuentra en desarrollo, si bien ya han sido analizados de forma previa algunos resultados (F2.2). Las fases F2.3 y F2.4 todavía no han comenzado.
Principales dificultades		Muchos de los protocolos programados en cada máquina proceden de peticiones individuales de los radiólogos que en algunos casos dan respuesta a casos particulares que deben ser valorados si es necesario mantener. Unos protocolos son complementarios de otros y deben analizarse si se fusionan o se mantienen separados. La programación de las distintas máquinas se corresponde con momentos diferentes, asociados principalmente a la instalación del equipo, por lo que está resultando complicado uniformizar los protocolos entre diferentes resonancias. Las marcas y modelos de las máquinas son diferentes, por lo que la programación no siempre puede hacerse de la misma forma.
Reducción de *Takt Time*		Todavía no se ha podido comprobar.

Tabla 19. Ficha de gestión del proyecto de solución S2

Proyecto	S3	Coordinación de recursos humanos y planificación trabajo
Objetivos		El objeto de este proyecto es aumentar la disponibilidad de determinados recursos cuando son demandados de forma puntual durante la realización de una prueba de resonancia. Los recursos requeridos forman parte de otros procesos diferentes al de resonancia, por lo que esta solución afecta a diferentes partes del sistema.
Alcance		Se coordinarán los recursos de médicos radiólogos, anestesistas y personal de enfermería. Se actuará en diferentes áreas: diagnóstico por imagen, quirófano, enfermería.
Duración		Se estima una duración de 4 meses.
Fases		Se compone de 2 fases. Una para elaboración de un nuevo procedimiento de organización, que incluirá un sistema de comunicación y otra para la formación de las personas.
F1	**F1.1**	Análisis del procedimiento de comunicación y localización actual.
F1	**F1.2**	Elaboración de nuevo procedimiento.
F1	**F1.3**	Diseño de herramientas de comunicación y programación.
F1	**F1.4**	Implementación piloto.
F2	**F2.1**	Formación del personal.
F2	**F2.1**	Implementación.
Recursos		Este proyecto afecta a varios procedimientos fuera del servicio de diagnóstico por imagen, por lo que implicará a los responsables de distintas áreas: jefe de servicio de diagnóstico por imagen, jefe de servicio de anestesia y dirección de enfermería. Dentro de cada área se elegirán dos recursos para elaborar el procedimiento. El director de calidad coordinará a todas las partes y facilitará la redacción y diseño formal de la documentación y herramientas de comunicación y programación de uso de los recursos.
Estado		Los diferentes procedimientos han sido modificados. Está pendientes de aprobación y de incorporación al sistema de gestión de la calidad. Se ha puesto de manifiesto la relevancia del uso de herramientas visuales de comunicación y el envío de la programación de las pruebas para mejorar el uso de los recursos. Actualmente se encuentra en la fase final de implantación.
Principales dificultades		La principal dificultad que se ha encontrado en la redacción de los documentos ha sido tener en cuenta el resto de tareas que realizan estos recursos fuera del servicio de diagnóstico por imagen. No son recursos ociosos a la espera de ser demandados. También se ha tenido en cuenta que no se puede programar sin holgura, ya que existen casos que deben ser atendidos de forma inmediata.
Reducción de *Takt Time*		Tras las primeras pruebas se puede considerar que la reducción del *Takt Time* prevista de -0,5 min/prueba se ha logrado..

Tabla 20. Ficha de gestión del proyecto de solución S3

Proyecto	S4	Información al paciente y formación del personal técnico
Objetivos		El objeto de este proyecto es dar la formación y proporcionar las herramientas interpersonales a los técnicos especialistas en radiodiagnóstico para que puedan ayudar al paciente durante el proceso de realización de una prueba.
Alcance		La formación se dará a los técnicos con el fin de que puedan ayudar al paciente ante las principales causas por las que la prueba se retrasa: miedo a la prueba en general, molestias por el ruido, claustrofobia, cansancio y frío por permanecer inmóviles.
Duración		Se estima una duración de 3 meses.
Fases		Se han definido dos fases. Elaboración del contenido de la formación, en el que se incluye el análisis de las principales causas de los retrasos y e implantación mediante la formación y el seguimiento.
F1	**F1.1**	Análisis de las principales causas de retraso.
F1	**F1.2**	Preparación del contenido del curso.
F1	**F1.3**	Elaboración de herramientas: información, argumentario.
F2	**F2.1**	Formación.
F2	**F2.2**	Seguimiento.
Recursos		El responsable del proyecto es el supervisor del servicio de diagnóstico por imagen. La elaboración del contenido se ha desarrollado por tres técnicos especialistas en radiodiagnóstico con suficiente experiencia en el servicio y con ayuda del servicio de psicología del hospital. La formación corre a cargo del servicio de diagnóstico por imagen y del departamento de formación.
Estado		Se ha completado la primera fase. De la segunda fase está completada la formación y pendiente de realización el seguimiento de las medidas adoptadas.
Principales dificultades		Los técnicos especialistas en radiodiagnóstico han mostrado cierta resistencia a esta formación porque consideran que ya realizan esa función de información y acompañamiento adecuadamente. Ha habido que reenfocárselo desde el punto de vista del paciente, ya que el foco no está en cómo hacen su trabajo los técnicos, sino en el impacto real que tiene sobre el paciente.
Reducción de *Takt Time*		Se ha comprobado algún impacto positivo en algunos pacientes pero todavía no se comprobado con un número mayor y en un plazo suficientemente largo. Se ha calculado que la reducción obtenida hasta el momento es de -0,5 minutos/ prueba frente a los 0,9 minutos estimados propuestos inicialmente.

Tabla 21. Ficha de gestión del proyecto de solución S4

Proyecto	S5	Actuación sobre el ruido
Objetivos		El objetivo de esta actuación es la reducción del ruido que el paciente percibe dentro de la sala de exploración y del nivel sonoro en el exterior de la sala. La percepción de ruido es algo subjetivo por lo que es necesario medir con un sonómetro el nivel sonoro para comprobar la efectividad de las medidas. Dado que no es posible reducir el nivel de ruido de la fuente se actuará sobre el aislamiento acústico de la sala y otros sistemas personales de atenuación sonora.
Alcance		Se actúa sobre el aislamiento de la sala de exploración para evitar que el nivel sonoro exterior sea elevado. Se actúa proporcionando equipos de protección individual con control activo del ruido al paciente dentro de la sala de exploración.
Duración		Se estima una duración de 3 meses.
Fases		El proyecto se compone de dos fases. En la primera se realizan las mediciones de ruido antes de tomar ninguna medida y se realiza una pequeña encuesta al paciente sobre la percepción del ruido. En la segunda fase se implantan las medidas y se vuelve a comprobar nivel acústico y sensación del paciente.
F1	**F1.1**	Medición de niveles sonoros en la sala de exploración y fuera de ella.
F1	**F1.2**	Encuesta de percepción del nivel sonoro del paciente.
F1	**F1.3**	Actuación sobre el aislamiento acústico de la sala.
F1	**F1.4**	Selección de equipos de reducción activa del ruido.
F2	**F2.1**	Medición de niveles sonoros en la sala de exploración y fuera de ella.
F2	**F2.2**	Encuesta de percepción del nivel sonoro del paciente.
F2	**F2.3**	Análisis de las mediciones y encuestas de percepción.
Recursos		Participan en este proyecto una empresa para la medición de nivel sonoro, así como un proveedor especializado en instalación de resonancias magnéticas para analizar los elementos que se deben reforzar para atenuar el ruido. Dirige el proyecto el supervisor del departamento de diagnóstico por imagen y participan dos técnicos especialistas en radiodiagnóstico como apoyo técnico.
Estado		El proyecto ha finalizado en el plazo previsto. Se han comunicado los resultados a los diferentes responsables: jefe de servicio de diagnóstico por imagen y gerencia. Se ha hecho un comunicado a todas las personas que forman parte del servicio.
Principales dificultades		La principal dificultad ha venido por las modificaciones que ha sido necesario realizar en la sala, que interfería con la planificación de trabajo del servicio.
Reducción de *Takt Time*		En principio parece haberse logrado el objetivo inicial de reducción de -0,5 minutos por prueba.

Tabla 22. Ficha de gestión del proyecto de solución S5

4.2 Análisis de correlación entre el mantenimiento y otras variables hospitalarias

En este apartado se estudian las correlaciones entre las variables de mantenimiento de los equipos de electromedicina y las de infraestructura y asistenciales utilizando modelos de regresión lineal y análisis centrados en la estadística inferencial. Finalmente se plantean indicadores de coste para el conjunto de hospitales.

4.2.1 Variables analizadas

Se analizan 5 variables dependientes, basadas en los costes y operativa de mantenimiento de equipos de electromedicina, a través de 14 variables independientes que a su vez se dividen en dos grupos: 7 de recursos hospitalarios y 7 asociadas al uso que el paciente hace de los recursos asistenciales o número de actos médicos.

En la tabla 23 se muestran las variables independientes.

Tipo	Subtipo	Descripción	Variable	VAR
Recursos	Infraestructura	Asociada a las características de diseño del edificio	Superficie hospital (m2)	ARE
			Camas (nº)	BED
			Quirófanos (nº)	OPR
			Antigüedad del edificio (años)	BUA
	Equipamiento	Equipos de electromedicina	Valor adquisición equipos (€)	AQV
			Antigüedad de equipos (años)	EQA
	Personal	Enfermeras y auxil.	Personal enfermería (nº)	NUR
Actos médicos	Consultas	Vías de captación o ingreso al sistema	Consultas anuales (nº)	CON
			Pruebas radiológicas anuales (nº)	DIM
			Urgencias anuales (nº)	EME
	Cirugía	Cirugías con ingreso o ambulantes	Cirugías con ingreso anuales (nº)	SUR
			Cirugías ambulantes anuales (nº)	AMB
	Estancia	Ingreso hospitalario y estancia	Ingresos hospital anuales (nº)	ADM
			Tiempo estancia hospital (días)	STA

Tabla 23. Clasificación de las variables independientes del modelo

Las variables de los recursos que el hospital dispone para la realización de los diferentes procesos estudiados se clasifican en infraestructura (ARE, BED, OPR, BUA), equipamiento (AQV, EQA) y personal de enfermería (NUR). Son la base para que se puedan desempeñar las diferentes tareas. En general estas variables permanecen constantes en el corto y medio y plazo, ya que requieren de elevadas inversiones realizar cambios. Por otro lado, las variables asistenciales que contabilizan los actos médicos asociados al uso que el paciente hace de los recursos hospitalarios se clasifican en consultas (CON, DIM, EME), cirugías (SUR, AMB) e ingreso y estancia hospitalaria (ADM, STA). En la mayoría de los casos esta información es de fácil obtención e incluso accesible de forma públicas a través de la memoria anual de los hospitales.

El uso de los servicios del hospital por parte de los pacientes genera incidencias de mantenimiento que se traducen en costes. Las variables dependientes se dividen en dos grupos: las de operativa que incluyen el número de incidencias anuales producidas y su tiempo medio de resolución (TIM, NUM) y las de coste, desglosadas en costes de mano de obra (LAB), costes de los materiales (MAT) y costes totales (TOT).

4.2.2 Modelos de regresión simple

A continuación, se analizan las correlaciones dos a dos de las 19 variables del modelo, así como sus rectas de regresión lineal. Se plantean 70 relaciones, estudiando la combinación de las 5 dependientes y las 14 independientes. El criterio usado para determinar los modelos regresión que resultan explicativos ha sido que el coeficiente de determinación (R^2) sea superior a 0,8000. Los valores inferiores se consideran correlaciones débiles y por lo tanto quedan excluidas del alcance del estudio.

En la tabla 24 se muestran los coeficientes de determinación (R^2) calculados para cada una de las variables independientes asociadas a los recursos y al uso que el paciente hace de ellos.

	VARIABLES ASOCIADAS A RECURSOS							VARIABLES ASOCIADAS AL USO						
	ARE	**BED**	**OPR**	**NUR**	**AQV**	**EQA**	**BUA**	**CON**	**DIM**	**EME**	**ADM**	**SUR**	**AMB**	**STA**
TIM	0,0914	0,1040	0,0805	0,1507	0,1357	0,1990	0,0008	0,2165	0,1547	0,2876	0,1167	0,0941	0,3319	0,1534
NUM	0,3797	0,6631	0,6553	0,7147	0,6949	0,0447	0,0166	0,5376	0,4987	0,6800	0,8171	0,8619	0,5926	0,4762
MAT	0,5792	0,8028	0,8003	0,8349	0,8233	0,0025	0,0515	0,5902	0,4819	0,7866	0,8947	0,9147	0,4632	0,6363
LAB	0,7516	0,8367	0,8001	0,7112	0,9455	0,0004	0,2577	0,6498	0,5217	0,7220	0,8427	0,6556	0,2627	0,8718
TOT	0,7433	0,8710	0,8354	0,7793	0,9617	0,0000	0,2018	0,6597	0,5382	0,7759	0,8997	0,7529	0,3231	0,8581

Tabla 24. Coeficientes de determinación (R^2)

El tiempo medio de resolución de incidencias (TIM) no ha resultado relacionado con ninguna de variable independiente debido a que este parámetro está condicionado por los recursos disponibles de las empresas mantenedoras y no por los recursos de infraestructura, personal, equipamiento o de uso del hospital [148].

El resto de las variables del modelo tienen algún tipo de explicación a través de las variables independientes. El número de incidencias de mantenimiento (NUM) se asocia solo con dos variables asistenciales. El coste anual total (TOT), coste anual de la mano de obra de las intervenciones (LAB) y coste anual de los materiales de las intervenciones (MAT) tienen una alta correlación con otras 7 variables.

4.2.2.1 Análisis de las variables independientes asociadas a los recursos

Las variables independientes de recursos que han resultado relacionadas son número de camas **(BED)** y quirófanos **(OPR)**, recursos de enfermería **(NUR)** y valor de compra del equipamiento electromédico **(AQV)**.

BED y OPR: El número de camas y el número de quirófanos permite explicar los tres tipos de coste (MAT, LAB, TOT), dado que están relacionados con el volumen de equipos existentes en cada hospital. Un mayor número de camas y de quirófanos es un indicador de tamaño y posiblemente de complejidad del hospital y por lo tanto del número de equipos.

NUR: El número de recursos de enfermería explican adecuadamente el coste de materiales (MAT), ya que estas personas son las que operan sobre los equipos electromédicos como usuario activo. En hospitales con mayor cantidad de personal, los operadores de los equipos cambian con más frecuencia y da lugar a una mayor manipulación por diferentes personas con distinto cuidado sobre el equipo y con mayor dilución de responsabilidad. Además, en aquellos equipos que tienen movilidad, se pueden realizar traslados que producen un mayor deterioro por golpes.

AQV: El valor de la compra del equipamiento electromédico se correlaciona altamente con las tres variables de coste (MAT, LAB, TOT). En hospitales más grandes el coste total de la compra de los equipos no solo aumenta por volumen sino por complejidad y especificidad de los equipos. De esta forma, cuanto mayor es el valor del equipo, mayor es el coste de las piezas usadas en sus reparaciones, requiere de una formación más especializada de los técnicos e ingenieros y posee una tecnología con mayor I+D, lo que implica un aumento de los costes de mantenimiento, tanto de materiales como de mano de obra [149].

No explican las variables dependientes la superficie del hospital **(ARE)**, antigüedad del equipamiento **(EQA)** y la antigüedad del edificio **(BUA)**.

ARE: El área del hospital no se relaciona con las variables dependientes debido a que la densidad de equipos por unidad de superficie puede variar de un centro a otro según antigüedad del edificio, ubicación o diseño inicial previsto. Por tanto, no se puede analizar la superficie sin introducir algún otro parámetro de ponderación o de ajuste (no contemplado en el alcance de este trabajo).

EQA: En el caso de la antigüedad del equipamiento electromédico se puede justificar la falta de conexión porque los equipos son mantenidos adecuadamente según las recomendaciones del fabricante, existen planes de mantenimiento preventivo y estos no se encuentran fuera del periodo de fin de servicio, por lo que la obsolescencia no tiene un papel significativo [150].

BUA: La antigüedad del edificio no tiene correlación con otras variables, porque el estado de mantenimiento es adecuado y no afecta al contenido.

4.2.2.2 Análisis de las variables independientes asociadas al uso

Las variables de actos médicos que han resultado correlacionadas según el criterio establecido son número de ingresos **(ADM)**, número de cirugías con ingreso **(SUR)** y tiempo total estancia hospitalaria **(STA)**.

ADM: En los hospitales con mayor número de ingresos se produce un uso más intensivo del equipamiento, lo cual justifica que se produzcan más incidencias por equipo (NUM) y mayores costes (MAT, LAB, TOT). Se ha comprobado que el número de incidencias de mantenimiento está fuertemente vinculado a la intensidad de uso de los equipos electromédicos [151]. Además, el cambio del equipo de un paciente a otro, en general implica más deterioro del mismo porque se produce una mayor manipulación: configuración, ajustes y traslados.

SUR: El número de cirugías de quirófano resulta ser un buen indicador de la actividad global del hospital y por lo tanto de la intensidad de uso, lo cual genera incidencias y costes asociados (NUM, MAT). Aproximadamente un tercio de los equipos analizados (1.508) se encuentran en el bloque quirúrgico, y tienen una tecnología y complejidad mayor que las de otros departamentos. El quirófano es un entorno muy exigente que traslada la presión de la operativa al uso del equipamiento y por lo tanto da lugar a más averías e incidencias [152].

STA: La variable STA ha resultado relacionada con los costes de mano de obra (LAB) y totales (TOT). Las estancias aportan información sobre la ocupación del hospital y sobre la intensidad de uso. Adicionalmente en hospitales con ingresos de corta estancia, la manipulación de los equipos es mayor y por lo tanto se produce un mayor deterioro.

No han resultado correlacionadas según el criterio del coeficiente de determinación (R^2 superior a 0,8000) el número de urgencias **(EME)**, número de consultas **(CON)**, número de cirugías ambulantes sin ingreso **(AMB)** y número de pruebas radiológicas **(DIM)**.

EME: La actividad de la urgencia es un subconjunto de la actividad global del hospital, sin embargo, la tipología de equipos es limitada y no resulta representativa del conjunto del equipamiento instalado. Aun así, el coeficiente de determinación presenta relaciones moderadas, en algún caso cercana al valor de aceptación $0{,}6800 < R^2 < 0{,}7900$.

CON y AMB: No explican el comportamiento de las variables dependientes por el menor uso y tipología de equipamiento que tienen asociado.

DIM: El servicio de diagnóstico por la imagen (DIM) no tiene relación con otras variables debido a que equipos de diagnóstico por imagen quedaron excluidos del alcance del estudio.

4.2.3 Relaciones según variables de recursos

4.2.3.1 Relación con la superficie del hospital

La figura 15 representa las rectas de regresión entre las variables dependientes y la variable superficie del hospital (ARE).

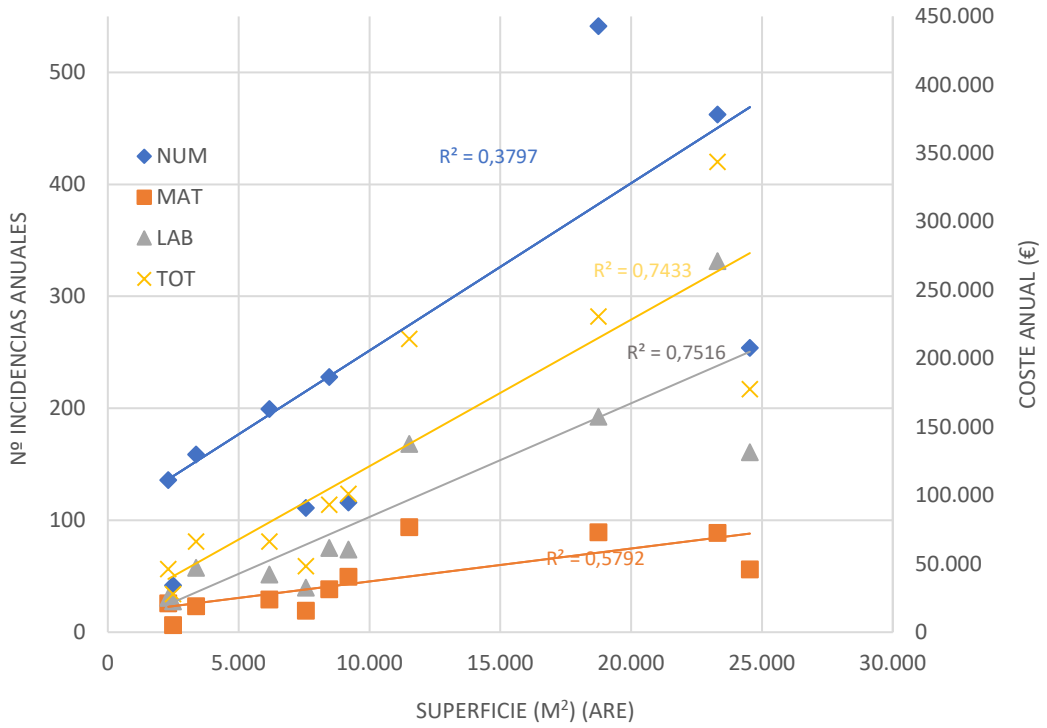


Figura 15. Análisis de la relación entre los costes mantenimiento, número de incidencias y la superficie del hospital

Según el criterio de R^2 establecido, ninguna variable de mantenimiento se puede explicar a través de la superficie del hospital. El número de incidencias (NUM) y los costes de materiales (MAT) tienen valores de R^2 bajos. Los costes de mano de obra (LAB) y costes totales (TOT) tienen una $R^2 > 0{,}7400$ en ambos casos, mostrando una correlación moderada, pero sin llegar superar el valor de 0,8000.

Los hospitales analizados tienen diseños arquitectónicos variados. En algunos casos son edificios urbanos con una fuerte presión para el crecimiento en superficie. Estos centros suelen tener una alta concentración de equipos por unidad de área. En los hospitales más modernos las superficies son mayores para obtener un mayor confort de los pacientes y trabajadores [153].

Intuitivamente la operativa del mantenimiento debería ser proporcional a la superficie, pero no ha resultado correlacionada porque intervienen otras variables no contempladas en el modelo.

4.2.3.2 Relación con el número de camas

La figura 16 contiene las rectas de regresión según número de camas.

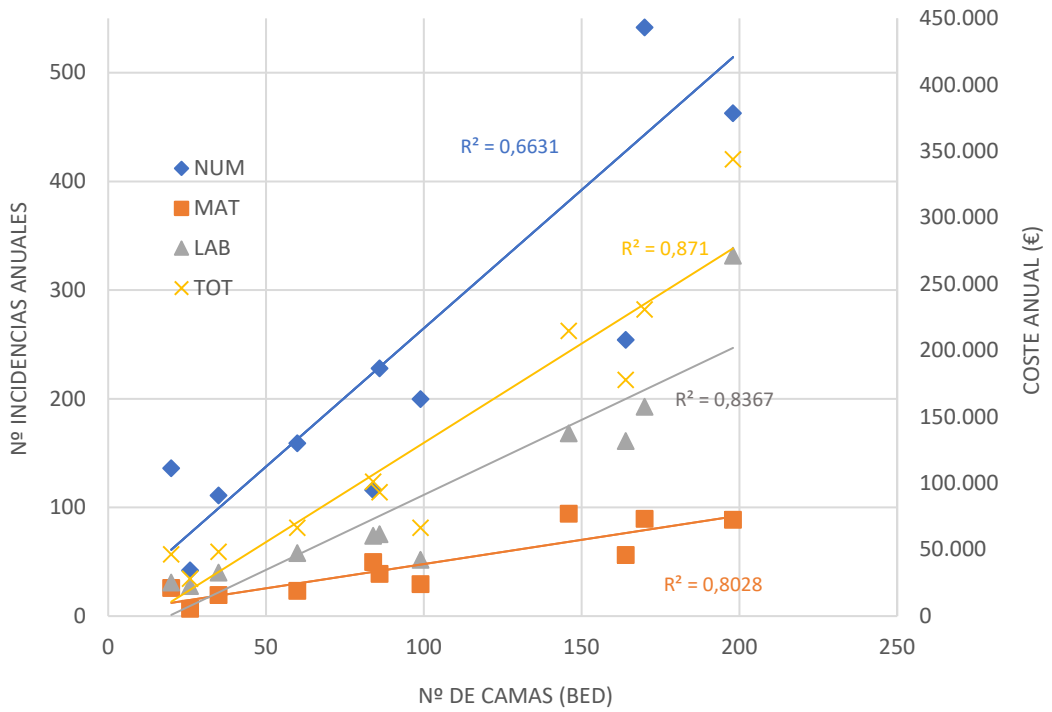


Figura 16. Análisis de la relación entre los costes mantenimiento, número de incidencias y el número de camas del hospital

Se observa correlación entre los costes totales de mantenimiento (TOT; R^2=0,8710), los costes de mano de obra (LAB; R^2=0,8367) y los costes de los materiales (MAT; R^2=0,8028) frente al número de camas del hospital (BED). El número de incidencias (NUM, R^2=0,6631) no alcanza el criterio $R^2 > 0,8000$.

Las rectas de regresión de las variables correlacionadas son:

$$TOT = 1.494,07 \times BED - 18.988,43 \quad (6)$$

$$LAB = 1.129,16 \times BED - 21.664,66 \quad (7)$$

$$MAT = 3.64,90 \times BED + 2.676,23 \quad (8)$$

La variable número de camas (BED) parece ser representativa de la actividad y del uso del equipamiento, es decir, cuantas más camas tiene el hospital, mayor necesidad de equipos electromédicos existe. Consecuentemente, un mayor uso se asocia a más incidencias y mayores costes.

El número de camas tiene cierta relación con la superficie del centro, si bien, como se discutió en el apartado anterior, la concentración de mobiliario en el hospital puede cambiar de uno a otro en función del diseño, estructura, zona geográfica etc.

4.2.3.3 Relación con el número de quirófanos

La figura 17 muestran las rectas del modelo según número de quirófanos (OPR).

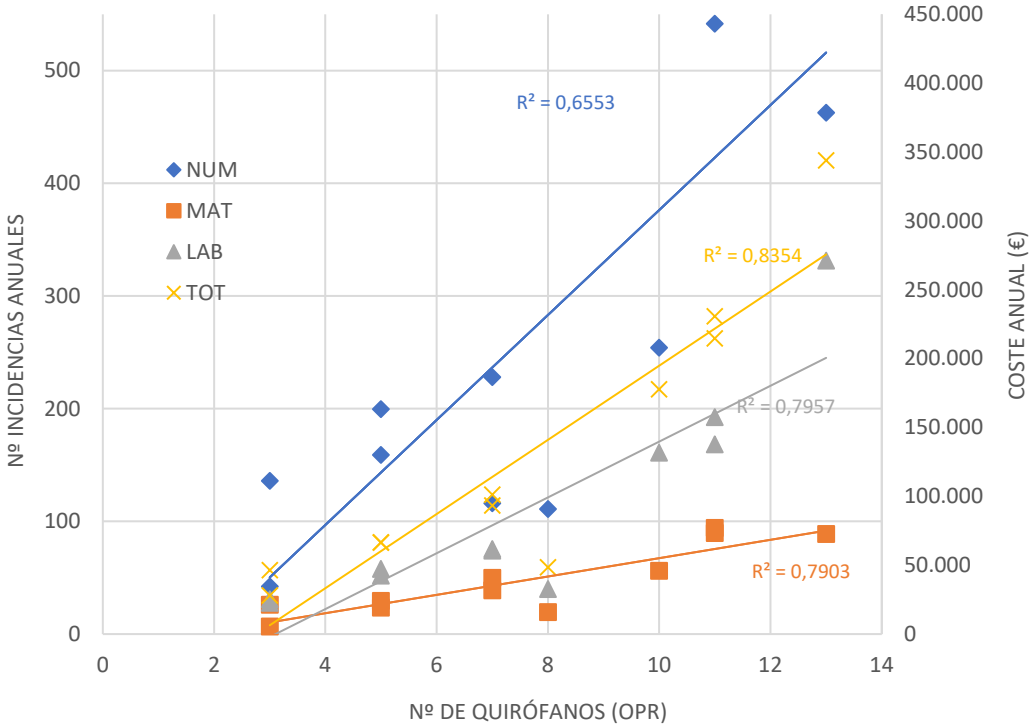


Figura 17. Análisis de la relación entre los costes mantenimiento, número de incidencias y el número de quirófanos del hospital

Existe correlación entre los costes totales de mantenimiento (TOT; R^2=0,8354), los costes de mano de obra (LAB; R^2=0,8001) y los costes de materiales (MAT; R^2=0.8003) frente al número de quirófanos del hospital (OPR). El número de incidencias (NUM) se relaciona débilmente (R^2=0,6553).

Las rectas de regresión para los modelos relacionados son:

$$TOT = 26.928,46 \times OPR - 74.399,27 \quad (9)$$

$$LAB = 20.265,25 \times OPR - 62.890,90 \quad (10)$$

$$MAT = 6.663,21 \times OPR - 11.508,37 \quad (11)$$

La actividad del área quirúrgica es un subconjunto de la realizada en el hospital. El número de quirófanos es proporcional a la actividad del servicio y de forma indirecta a la de todo el sistema. El quirófano es un grupo altamente representativo de las incidencias y costes de mantenimiento debido a que uno de cada tres equipos está asociado al proceso quirúrgico. Por otro lado, además del volumen de equipos existe un uso más intensivo y tienen un mayor valor de compra por lo que los costes de reparación son más elevados.

4.2.3.4 Relación con el personal de enfermería

En la figura 18 se representan las rectas de regresión del modelo.

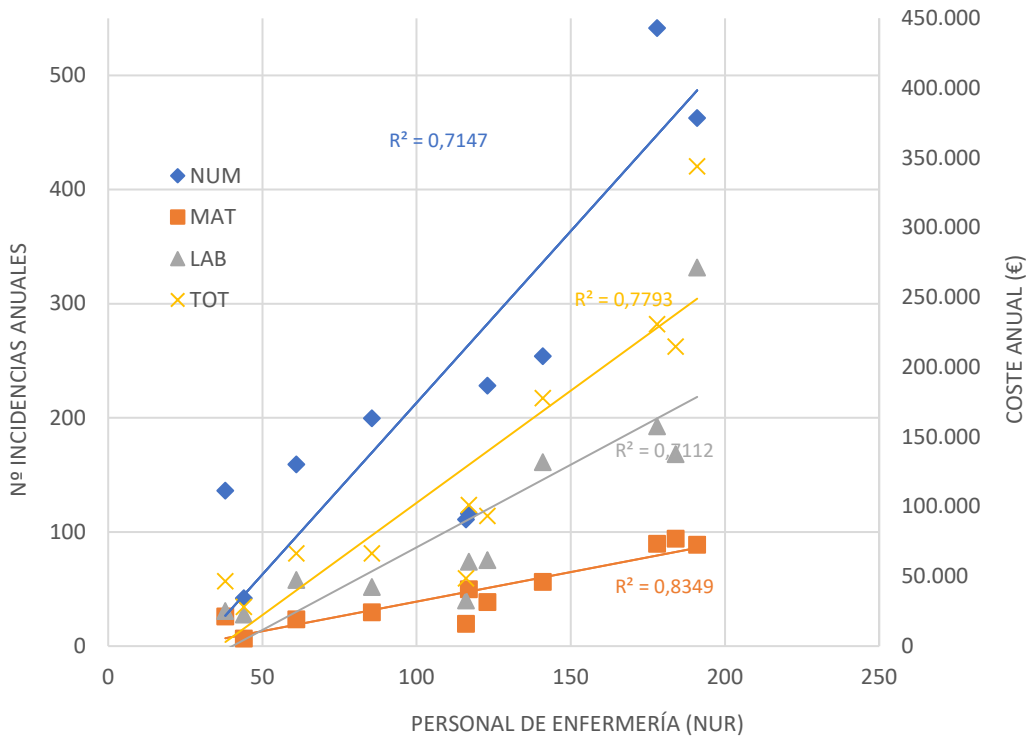


Figura 18. Análisis de la relación entre los costes mantenimiento, número de incidencias y el número de recursos de enfermería

Se observa que sólo la variable de coste de los materiales resulta relacionada con el número de personas de enfermería (MAT; R^2=0,8349) según el criterio R^2 > 0,8000. Los costes totales (TOT; R^2=0,7793) tienen un coeficiente muy cercano al criterio de aceptación, pero sin alcanzarlo. Son independientes el número de incidencias (NUM; R^2=0,7147) y los costes de mano de obra (LAB; R^2=0,7112), ya que muestran una relación moderada o débil.

La recta de regresión para los costes de materiales (MAT) es:

$$MAT = 423{,}59 \times NUR - 10.463{,}58 \qquad (12)$$

Esta correlación permite distinguir entre los dos tipos de usuario que se pueden considerar al analizar un equipo: sujeto activo (personal asistencial que opera sobre el equipo) y sujeto pasivo (paciente sobre el que se usa el aparato). El número de personas del departamento de enfermería es representativo de los costes de mantenimiento, debido a que son el sujeto activo del uso del dispositivo y por lo tanto de la actividad.

4.2.3.5 Relación con el valor de compra de los equipos de electromedicina

En la figura 19 se representan las rectas de regresión que relacionan el valor de compra de los equipos de electromedicina (AQV).

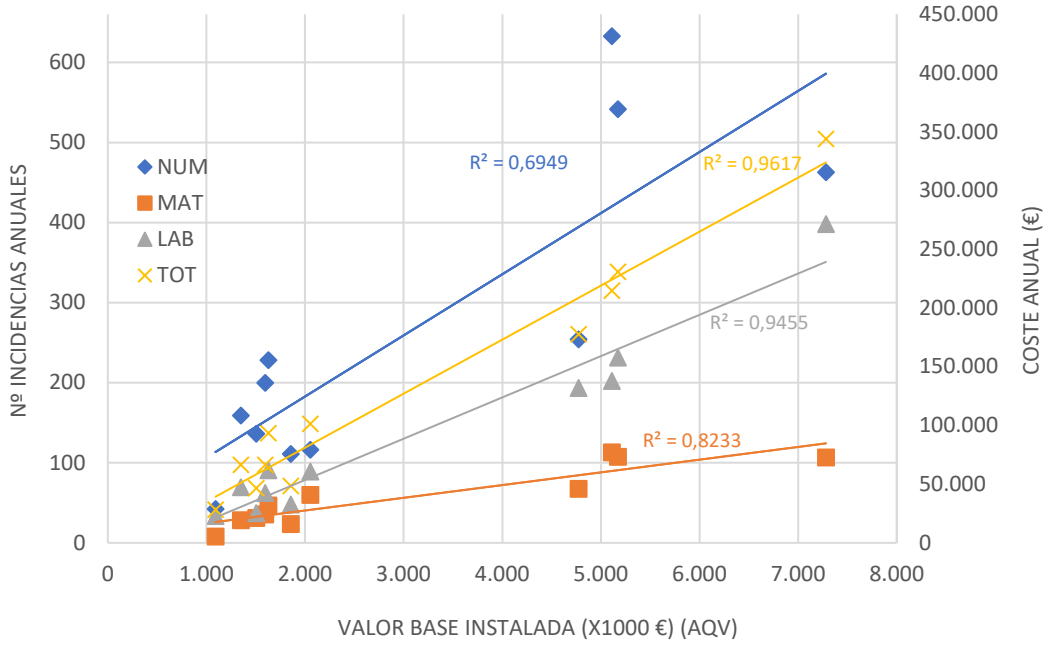


Figura 19. Análisis de la relación entre los costes mantenimiento, número de incidencias y el valor del equipamiento electromédico

Se demuestra la existencia de una alta correlación entre los costes totales de mantenimiento y el valor de compra del equipamiento (R^2=0,9617), así como con el coste de la mano de obra (LAB; R^2=0,9455) y los costes de los materiales (MAT; R^2=0,8233). Sin embargo, se observa que el número de incidencias (NUM; R^2=0.6949) no resulta relacionado.

Las rectas de regresión asociadas a las 3 variables son las siguientes:

$$TOT = 0{,}0460 \times AQV - 10.915{,}33 \quad (13)$$

$$LAB = 0{,}0352 \times AQV - 16.799{,}70 \quad (14)$$

$$MAT = 0{,}0108 \times AQV + 5.884{,}37 \quad (15)$$

Se comprueba que, en los hospitales con mayor valor de la base instalada de equipos, el coste de mantenimiento es superior. Esto se explica porque existe un volumen mayor de equipos y porque al aumentar el tamaño del hospital aumenta su complejidad y el coste unitario de las reparaciones [154].

4.2.3.6 Relación con la antigüedad de los equipos de electromedicina

La figura 20 muestra las rectas de regresión del modelo (EAQ)

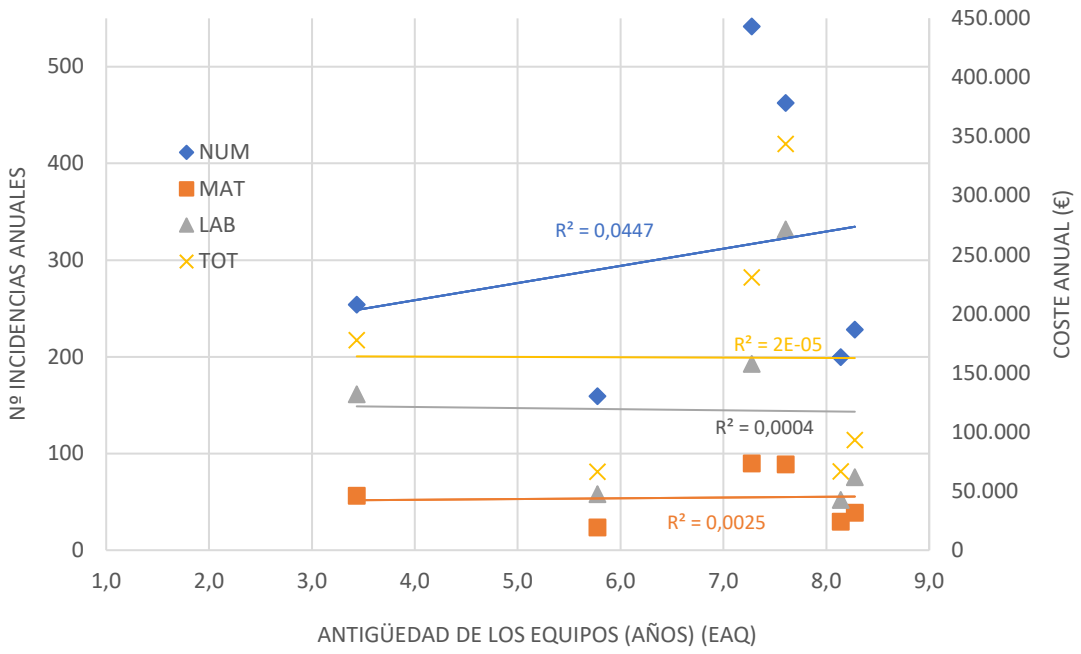


Figura 20. Análisis de la relación entre los costes mantenimiento, número de incidencias y la antigüedad del equipamiento electromédico

No se ha encontrado correlación entre la antigüedad de los equipos electromédicos y la operativa (NUM) y los costes de mantenimiento (TOT, LAB, MAT).

Sería esperable que a medida que los equipos van envejeciendo, el número de averías y por lo tanto los costes de mantenimiento fueran aumentando. No se ha encontrado esta vinculación porque los mantenimientos realizados a los equipos siguen las recomendaciones de actuaciones preventivas del fabricante a lo largo de toda su vida útil.

Además, las negociaciones de los costes de mano de obra con los proveedores se realizan sobre toda la base instalada por lo que no se distingue entre antigüedad de equipos para acordar el precio. Pueden existir equipos individuales que tengan esta vinculación entre costes y antigüedad, pero en el conjunto no se han podido apreciar.

4.2.3.7 Relación con la antigüedad del edificio

Las rectas de regresión de la antigüedad del edificio (BUA) se presentan en la figura 21.

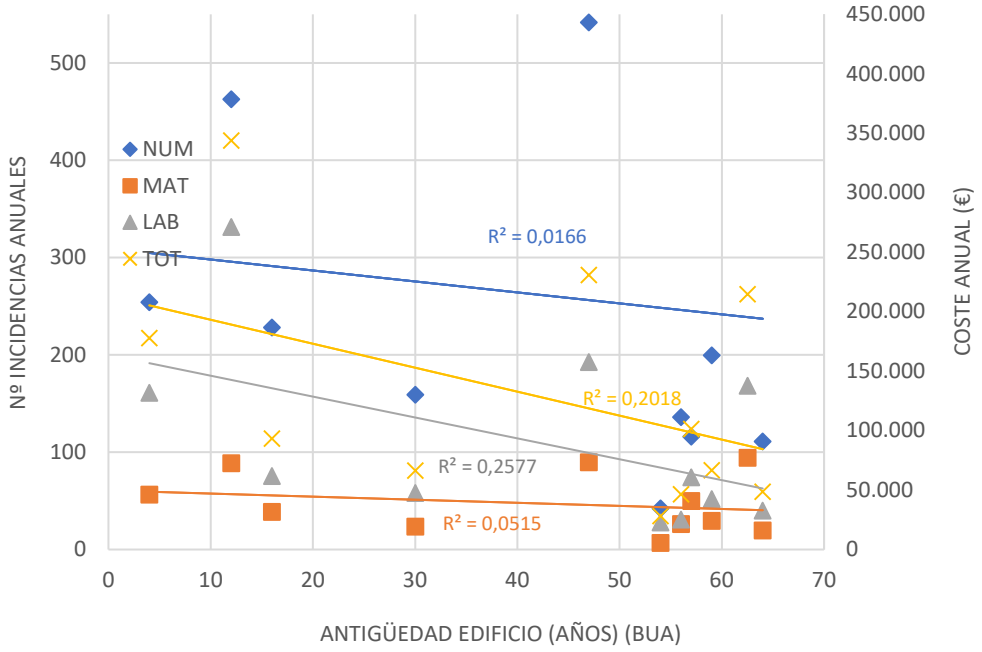


Figura 21. Análisis de la relación entre los costes mantenimiento, número de incidencias y la antigüedad del edificio

La antigüedad del edificio (BUA) no explica ninguna de las variables dependientes de costes (TOT, LAB, MAT), ni de la operativa del mantenimiento (NUM). Es una situación parecida a la descrita en el apartado anterior, ya que el efecto de la antigüedad queda absorbido si existe el mantenimiento adecuado de la infraestructura e instalaciones.

Por otro lado, el ciclo de vida de un edificio es mucho mayor que el de cualquiera de los equipos que contiene. Si el edificio y sus instalaciones están bien mantenidas no debe condicionar la funcionalidad del equipamiento electromédico, salvo que se encuentre en el final de su vida útil o no se hayan hecho las inversiones adecuadas en su mantenimiento.

4.2.4 Relaciones según uso de recursos por el paciente

4.2.4.1 Relación con el número de consultas anuales

En la figura 22 se representan las rectas de regresión del modelo de número de consultas anuales (CON).

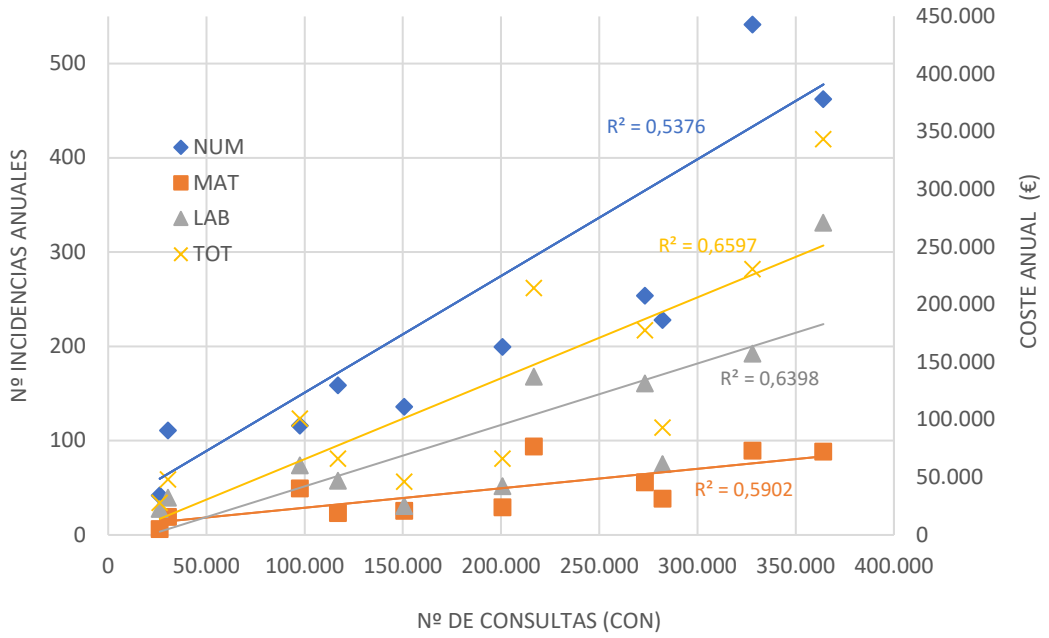


Figura 22. Análisis de la relación entre los costes mantenimiento, número de incidencias y el número de consultas

Según el criterio de aceptación del coeficiente de determinación $R^2 > 0{,}8000$ establecido, ninguna de las variables de mantenimiento se explica por el número de consultas realizadas en los hospitales. El número de incidencias (NUM) y los costes de materiales (MAT) tienen valores de R^2 en el entorno de 0,5. Los costes de mano de obra (LAB) y costes totales (TOT) tienen una $R^2 > 0{,}6300$ pero que sigue quedando lejos del valor de aceptación por lo que no se puede concluir que las variables se encuentren correladas.

El número de consultas es un indicador indirecto de la actividad del hospital, ya que parte de los pacientes que son atendidos en las consultas ingresan para algún proceso quirúrgico o tratamiento [155].

En este caso no se ha encontrado suficiente correlación porque las consultas asociadas al hospital no solo se realizan en el propio centro, sino que pueden darse en centros adscritos llamados policlínicos. El número de policlínicos y consultas no están asociados al tamaño del hospital, sino que tienen que ver con el área influencia que se desea tener.

4.2.4.2 Relación con el número de pruebas radiológicas anuales

La figura 23 contiene las rectas de regresión del número de pruebas de diagnóstico por imagen anuales (DIM).

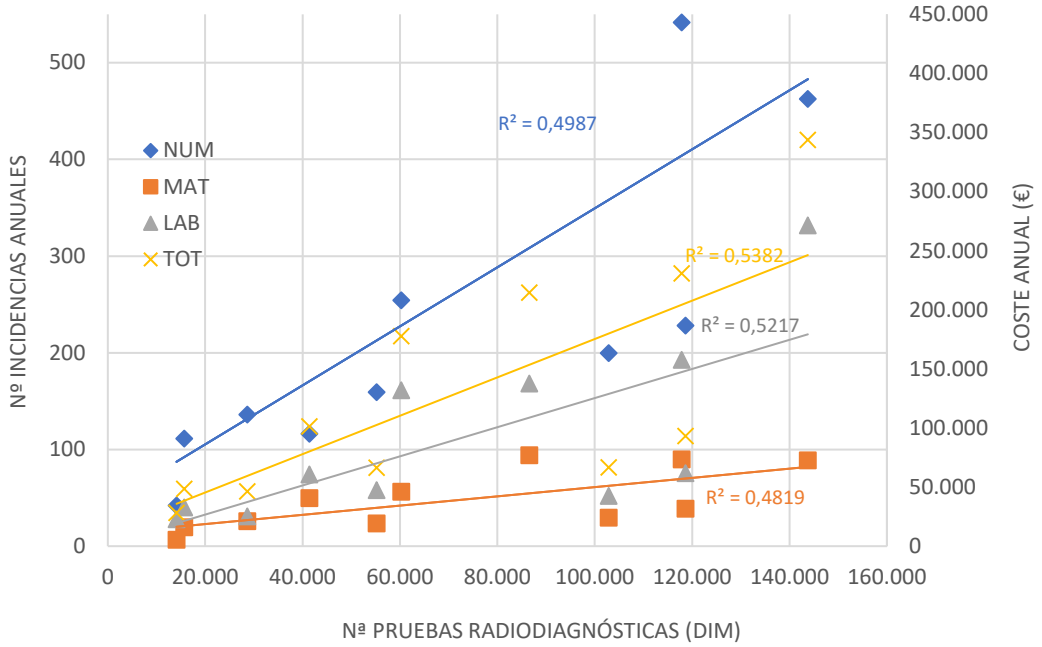


Figura 23. Análisis de la relación entre los costes mantenimiento, número de incidencias y el número de pruebas diagnósticas

Al igual que ocurría con el número de consultas, analizado en el apartado anterior, el número de pruebas radiodiagnósticas no alcanza el criterio de aceptación $R^2 > 0{,}8000$, por lo que ninguna de las variables de mantenimiento puede ser explicada. Todos los valores del coeficiente de determinación R^2 para número de incidencias (NUM), costes totales (TOT), costes de mano de obra (LAB) y costes de materiales (MAT) se encuentran en el rango de [0,4900;0,5400] lejos del criterio de aceptación, por lo que se considera que las variables no están relacionadas.

El número de pruebas radiodiagnósticas es un indicador de la actividad de las consultas y de forma indirecta de la actividad del hospital. No se ha encontrado suficiente correlación porque el paciente que pasa por el servicio de diagnóstico por imagen es un subconjunto del paciente ingresado y no resulta lo suficientemente representativo.

Por otro lado, las variables de mantenimiento de este apartado están referidas a los equipos de electromedicina, quedando expresamente excluidos los equipos de diagnóstico por imagen, que son los que se usan para la adquisición de imágenes.

4.2.4.3 Relación con el número de urgencias anuales

Se representan las rectas de regresión del modelo (EME) en la figura 24.

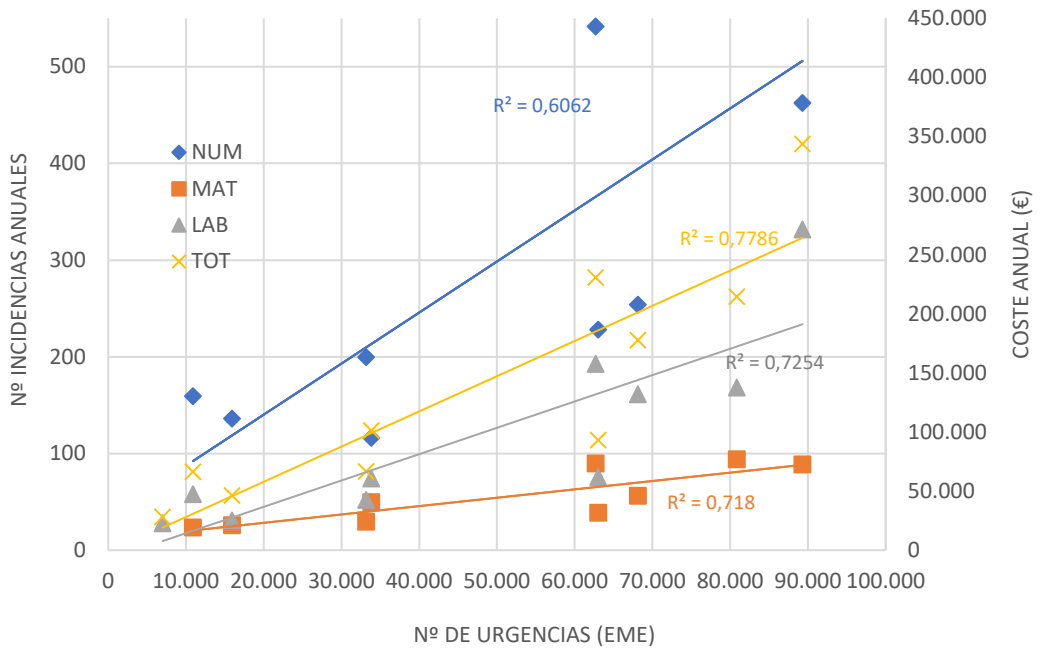


Figura 24. Análisis de la relación entre los costes mantenimiento, número de incidencias y el número de urgencias

Ninguna de las variables estudiadas ha superado el criterio de aceptación establecido para el coeficiente de determinación R^2> 0,8000. El número de incidencias (NUM) es el que obtiene el valor más bajo de R^2=0,6062. Sin embargo, el resto de variables tienen valores de R^2> 0,7200 relativamente cercanos al valor de aceptación. Concretamente para los costes totales (TOT) se obtiene una R^2=0,7786, próximo al criterio de referencia.

Las urgencias del hospital en general resultan ser un buen indicador de la actividad del hospital, porque suele ser proporcional a la actividad del conjunto del sistema o a otras variables relacionadas con la superficie o número de trabajadores [156]. Sin embargo, solo se ha encontrado una correlación moderada, posiblemente debido a que la tipología de equipos de electromedicina que hay instalados en la urgencia no resulta extrapolable al resto de procesos. En la urgencia se instalan equipos básicos de monitorización como tensiómetros, pulsioxímetros o desfibriladores. Estos dispositivos tienen un valor bajo en costes de mantenimiento.

4.2.4.4 Relación con el número de ingresos hospitalarios anuales

En la figura 25 se representa el modelo de regresión lineal del número de ingresos hospitalarios anuales (ADM).

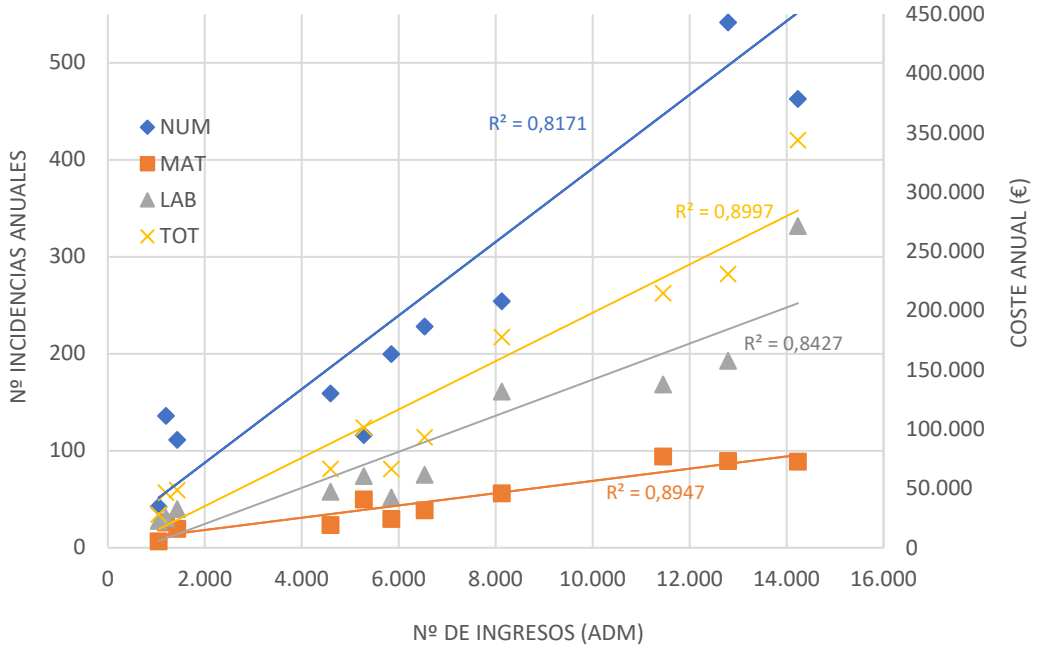


Figura 25. Análisis de la relación entre los costes mantenimiento, número de incidencias y el número de ingresos

Se comprueba la existencia de una elevada correlación entre el número de ingresos y los costes de mantenimiento a través de los costes totales (TOT; R^2=0,8997), costes de la mano de obra (LAB; R^2=0,8427) y costes de los materiales (MAT; R^2=0,8947). El número de incidencias también resulta correlacionado (NUM; R^2=0,8171) con un valor algo menor.

Las rectas de regresión asociadas a las 4 variables son:

$$NUM = 0{,}0379 \times ADM + 12 \quad (16)$$

$$TOT = 20{,}3898 \times ADM - 5.668 \quad (17)$$

$$LAB = 15{,}2170 \times ADM - 10.325 \quad (18)$$

$$MAT = 5{,}1728 \times ADM + 4\,658 \quad (19)$$

Se comprueba que el número de ingresos explica los costes de mantenimiento y operativa debido a que todo paciente ingresado hará uso de alguno de los equipos de electromedicina del centro.

4.2.4.5 Relación con el número de cirugías con ingreso anual

Las rectas de regresión del número de cirugías con ingreso anuales (SUR) se representan en la figura 26.

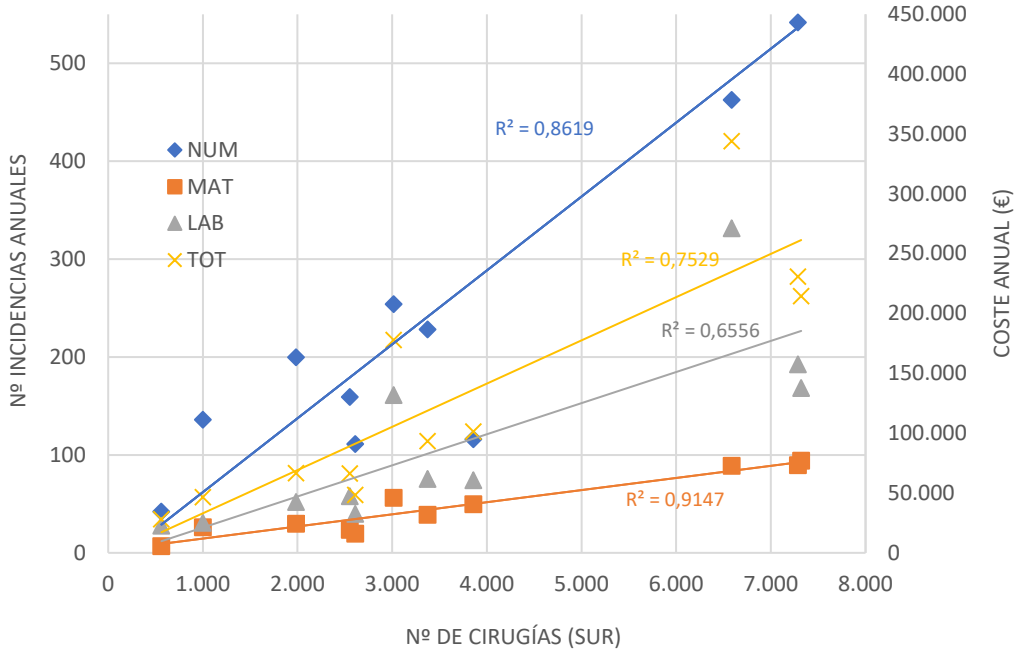


Figura 26. Análisis de la relación entre los costes mantenimiento, número de incidencias y el número de cirugías con ingreso

Se comprueba una alta correlación entre el número de cirugías y los costes de los materiales (MAT; R^2=0,9147) y el número de incidencias (NUM; R^2=0,8619). No han sido relacionados ni los costes de la mano de obra (LAB; R^2=0,6556) ni los costes totales (TOT; R^2=0,7529), si bien estos últimos han mostrado una correlación moderada cercana al criterio de aceptación R^2>0,8000 establecido.

Las rectas de regresión asociadas a las 2 variables son:

$$NUM = 0{,}0755 \times SUR - 14 \quad (20)$$

$$MAT = 10{,}1307 \times SUR + 1.791 \quad (21)$$

Aunque el número de cirugías es un subconjunto de la actividad total, resulta representativo de la actividad de mantenimiento debido al tipo de procesos realizados y la tipología de equipos instalados. Aproximadamente un tercio de todos los equipos están asociados a área de quirófano. Por otro lado, el nivel de complejidad del área quirúrgica resulta representativo del conjunto y por lo tanto es una buena referencia para vincularlo a la operativa de mantenimiento.

4.2.4.6 Relación con el número de cirugías ambulantes anuales

En la figura 27 se representan las rectas de regresión del modelo de cirugías ambulantes (AMB).

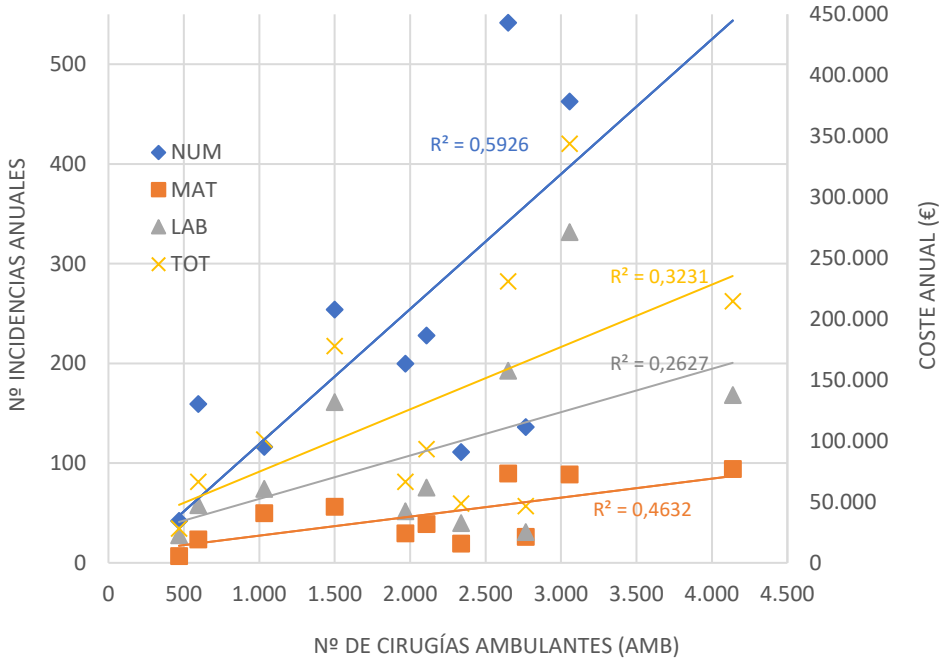


Figura 27. Análisis de la relación entre los costes mantenimiento, número de incidencias y el número de cirugías ambulantes

El número cirugías ambulantes no sido correlacionada con ninguna de las variables dependientes por no haber superado el criterio de aceptación R^2> 0,8000. Los valores del coeficiente de determinación R^2 para número de incidencias (NUM), costes totales (TOT), costes de mano de obra (LAB) y costes de materiales (MAT) están en el rango de [0,2627;0,5926], situándolos bastante lejos del valor de referencia.

A diferencia de la variable de cirugía con ingreso, la ambulatoria no representa adecuadamente actividad del centro. Es un tipo de cirugía menos compleja, cuya proporción no se relaciona con otras variables o con otros procesos hospitalarios.

La cirugía ambulatoria es proporcionalmente mayor a la que requiere ingreso hospitalario en centros de menor tamaño y menor número de ingresos. Esto se debe a que su complejidad es más adecuada para centros con menos recursos de equipamiento.

4.2.4.7 Relación con el tiempo de estancia hospitalaria

En la figura 28 se muestran las rectas de regresión de la variable días totales de estancia hospitalaria (STA).

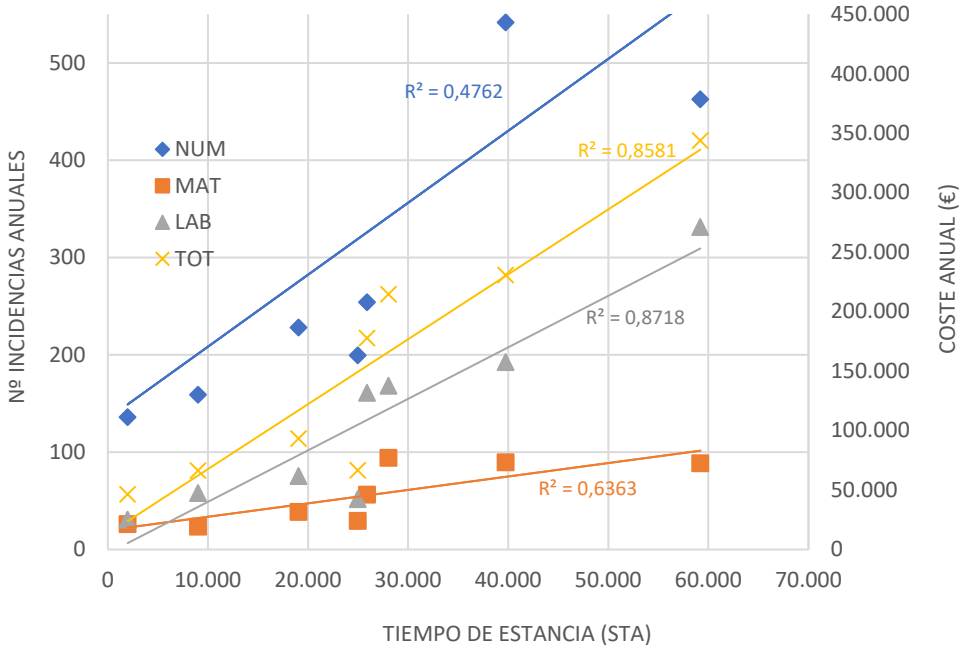


Figura 28. Análisis de la relación entre los costes mantenimiento, número de incidencias y el tiempo de estancia

Se comprueba una alta correlación entre los días de estancia y los costes totales de mantenimiento (TOT; R^2=0,8581) y el coste de la mano de obra (LAB; R^2=0,8718). No se han encontrado relaciones con los costes de materiales (MAT; R^2=0,6363) ni con el número de incidencias (NUM; R^2=0,4762). Contrasta la alta relación de los dos primeros (TOT y LAB) con los bajos valores de los MAT y NUM.

Las rectas de regresión asociadas a las 2 variables son:

$$TOT = 5{,}4593 \times STA + 13.019 \quad (22)$$

$$LAB = 4{,}3300 \times STA - 3.208 \quad (23)$$

El número de días de estancia es un indicador de la ocupación y de la intensidad de uso del equipamiento médico. Resulta adecuada para representar los costes del mantenimiento. A medida que aumentan los días de estancia se consumen más recursos hospitalarios.

4.2.5 Modelos de regresión multivariable

Dada la alta correlación comprobada entre las variables dependientes e independientes que se ha reflejado en los apartados anteriores, se han analizado varios modelos de regresión lineal multivariable con el fin de comprobar otras relaciones de orden superior.

Las variables dependientes seleccionadas para los modelos de regresión multivariable han sido el número de incidencias (NUM) y los costes de mantenimiento en sus tres variantes (TOT, LAB, MAT). Para cada modelo propuesto, se han seleccionado dos variables independientes (entre las que resultaron correlacionadas), provenientes de las variables de recursos: número de camas (BED), número de quirófanos (OPR), número de recursos de enfermería (NUR) y valor de adquisición de los equipos (AQV) y de variables de uso de los recursos: número de ingresos (ADM), número de cirugías (SUR) y tiempo total de estancia hospitalaria (STA).

De todas las posibles combinaciones de variables independientes tomadas de dos en dos para las cuatro dependientes (en total 4 x 21 modelos), han resultado relevantes, con criterio estadístico de $p < 0.05$ para la *t de Student*, seis modelos multivariable asociados a las variables de coste y ninguna para el número de incidencias (NUM).

En la tabla 25 se muestran las estadísticas de la regresión (coeficiente de correlación, R^2 y R^2 ajustada) y el análisis de la varianza ANOVA a través del estadístico *F de Fisher-Snedecor*.

	Variable	**Coef. Corr.**	**R^2**	**R^2 ajustada**	**F (*p-valor*)**
Número de incidencias (NUM)	Sin correlación multivariable				
Coste mano obra (LAB)	AQV & STA	0,9854	0,9710	0,9638	134,11 (0,0001)
	OPR & STA	0,9508	0,9039	0,8799	37,64 (0,0021)
Coste mat. (MAT)	BED & SUR	0,9762	0,9530	0,9412	81,05 (0,0003)
	AQV & SUR	0,9772	0,9549	0,9436	84,67 (0,0005)
Coste total (TOT)	AQV & ADM	0,9912	0,9824	0,9781	223,86 (0,0015)
	AQV & STA	0,9929	0,9858	0,9822	276,92 (0,0011)

Tabla 25. Estadísticas de la regresión multivariable

No se han encontrado modelos multivariable de 3 o más variables independientes, por lo que no se indican sus resultados. Tampoco se han tenido en cuenta las variables independientes que en el análisis de regresión lineal simple no resultaron correlacionadas en los apartados anteriores, es decir, superficie del hospital (ARE), antigüedad de los equipos electromédicos (EAQ), antigüedad del edificio (BUA), número de consultas (CON), número de pruebas de diagnóstico por imagen (DIM), número de urgencias (EME) y número de cirugías ambulantes (AMB).

En la figura 29 se muestra el gráfico de probabilidad normal de las variables de mantenimiento: costes totales, costes de mano de obra y de materiales. No se representan las variables de tiempo de resolución y número de incidencias porque no resultaron relacionadas.

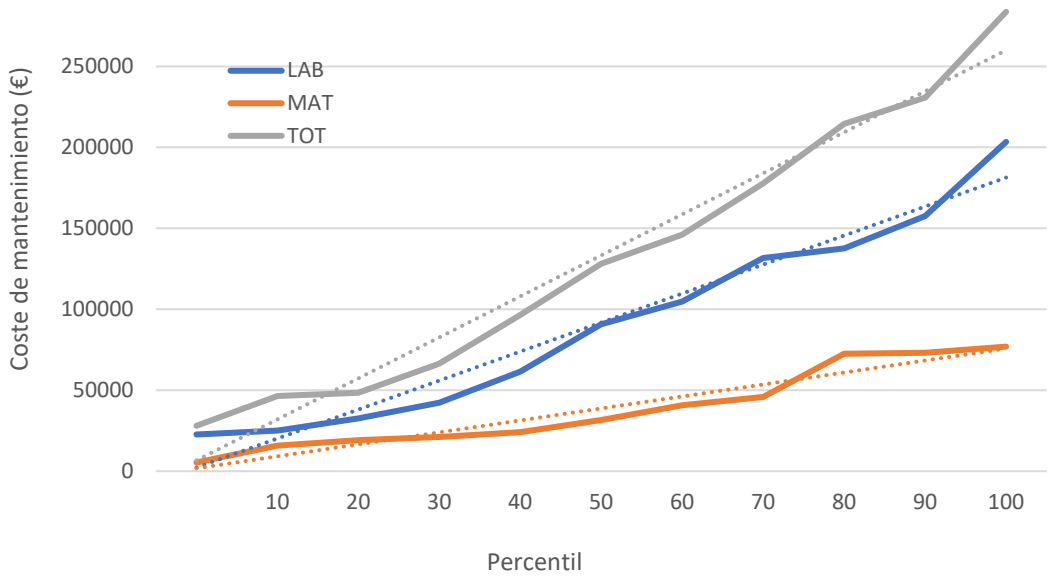


Figura 29. Gráfico de probabilidad normal

Se puede comprobar que los tres tipos costes siguen una distribución normal. Para ello se representan los valores empíricos obtenidos, junto con los valores teóricos de la distribución normal, representados como una recta. Si ambas curvas quedan cerca la una de la otra se puede concluir que el conjunto de datos del análisis tiene una distribución normal. Para los tres tipos de coste se da esta situación.

4.2.6 Análisis estadístico de varianza del tiempo de resolución de incidencias

En este apartado se profundiza en la relación del tiempo medio de resolución de incidencias (TIM) con otras variables del estudio, dado que esta variable no ha resultado correlacionada en ningún caso en los modelos de regresión analizados. Se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis estadístico de la varianza (ANOVA).

Superficie del hospital (ARE): Se observó que los hospitales de más de 8.000 m² tienen menos tiempo medio de resolución de incidencias por m² (F=12,23; *p*=0,0054) y menos tiempo medio de resolución de incidencias por cama (F=22,19; *p*=0,0011) que los de menos superficie.

Número de camas (BED): En los hospitales de más de 100 camas se necesita menos tiempo medio de resolución de incidencias por m² (F=5,36; *p*=0,0456) y menos tiempo medio de resolución de incidencias por cama (F=7,61; *p*= 0,0221), que los que tienen menos camas.

Número de quirófanos (OPR): Los hospitales con más de 8 quirófanos tienen menos tiempo medio de resolución de incidencias en los equipos electromédicos por m² (F=5,38; *p*=0,0456) que los que tienen menos quirófanos.

Número de consultas (CON): Los hospitales en los que realizan más de 200.000 consultas anuales, tienen menos tiempo medio de resolución de incidencias por quirófano (F=10,72; *p*=0.0096) menos tiempo medio de resolución de incidencias por m² (F=9,99; *p*=0,0115), menos tiempo medio de resolución de incidencias por cama (F=30,86; *p*=0,0003), más averías por quirófano (F=4,17; *p*=0,0714) y más costes de mantenimiento anual por quirófano (F=6,15; *p*=0,0315) que los que realizan menos de consultas por año.

Número de urgencias (EME): Los hospitales que tienen más de 50.000 urgencias anuales tienen menos tiempo medio de resolución de incidencias por m² (F=9,74; *p*=0,0142) y menos tiempo medio de resolución de incidencias por cama (F=10,56; *p*=0,0117) que los que tienen menos urgencias anuales.

Días de estancia (STA): Los hospitales con más de 25.000 días de estancia anual tienen menos tiempo medio de resolución de incidencias por m² (F=7,08; *p*=0,0260), menos tiempo medio de resolución de incidencias por cama (F=9,68; *p*=0,0125) y menos tiempo medio de resolución de incidencias por quirófano (F=8,18; *p*=0,0188) que los que tienen menos días de estancia anual. Sin embargo, tienen más costes totales de mantenimiento anual por quirófano (F=11,56; *p*=0,0079).

Se ha comprobado que el tiempo medio de resolución por incidencia (según número de camas, superficie y número de quirófanos) disminuye en hospitales que cumplen alguno de estos criterios: más de 8.000 m², más de 100 camas, más 8 quirófanos, más de 25.000 días de estancia, 50.000 urgencias, 200.000 consultas. Los recursos que el mantenedor dedica a los hospitales de mayor tamaño o uso más intensivo son más eficientes, ya que se generan economías de escala y se pueden agrupar varias reparaciones en la misma jornada de trabajo [157]. También en los hospitales grandes suele destinarse un espacio para taller de reparaciones, que sirve de pequeño de almacén de piezas y herramientas de uso frecuente, acortando los tiempos de actuación.

4.2.7 Indicadores de referencia

Se presentan distintos indicadores de referencia para los hospitales, incluyendo las ratios de coste y operación de mantenimiento. Son valores medios para el conjunto de los 12 hospitales analizados. El número total de incidencias y los tres tipos de coste se han dividido por el valor total de las variables de recursos y de uso, de forma que se obtiene una referencia de costes para el conjunto de los hospitales, así como para futuros hospitales de similares características. Estos valores se corresponden con un hospital de tipo medio de 10.700 m², 99 camas y 8 quirófanos. Se han desestimado las variables de antigüedad de equipamiento (EQA) y del edificio (BUA).

En la tabla 26 se muestran los indicadores del coste de mantenimiento.

Indicadores	**Unidades**	**MAT**	**LAB**	**TOT**	**VAR**
Coste anual de mantenimiento por m²	€/m²	3,6	8,4	12,03	ARE
Coste anual de mantenimiento por cama	€/cama	392	910	1302	BED
Coste anual de mantenimiento por quirófano	€/qx	5138	11.930	17.068	OPR
Coste anual de mantenimiento por personal de enfermería	€/enf	334	775	1.109	NUR
Coste anual de mantenimiento por valor de adq. (x1000)	€/adq	13	30	43	AQV
Coste anual de mantenimiento por consulta	€/con	0,2	0,5	0,7	CON
Coste anual de mantenimiento por prueba de DIM	€/dim	0,5	1,3	1,8	DIM
Coste anual de mantenimiento por ingreso en urgencias	€/urg	0,9	2,1	3,0	EME
Coste anual de mantenimiento por ingreso hospitalaria	€/ing	5,9	13,7	19,6	ADM
Coste anual de mantenimiento por cirugía	€/cir	10,6	24,7	35,3	SUR
Coste anual de mantenimiento por cirugía ambulatoria	€/cir amb	18,9	43,8	62,7	AMB
Coste anual de mantenimiento por estancia	€/est	1,8	4,1	5,9	STA

Tabla 26. Indicadores de coste de mantenimiento

Se comprobó que el análisis separado de los costes de la mano de obra (70%) de los materiales (30%) resulta adecuado porque permite valorar la influencia de los recursos humanos en el proceso. Esta separación de costes permite analizar la influencia de factores como formación y disponibilidad de los técnicos, cantidad de personal, asistencia continua, servicio 24/7, acceso a los suministradores de materiales, logística de envío y plazos de entrega [158].

Como alternativa a este análisis se puede realizar la división del mantenimiento en preventivo y correctivo, el cual absorbe el 30% y 70% de los costes de totales respectivamente. Sin embargo, no permite relacionar las causas de forma tan directa como en el caso anterior. Esta separación es adecuada para definir el alcance de los contratos y para realizar el presupuesto anual [159].

La tabla 27 se muestran las ratios de la variable número de incidencias

Indicadores	Unidades	Num	Var
Número anual de incidencias por m²	Nº/m² (x1000)	24,5	ARE
Número anual de incidencias por cama	Nº/cama	2,6	BED
Número anual de incidencias por quirófano	Nº/qx	34,7	OPR
Número anual de incidencias por personal de enfermería	Nº/enf	2,3	NUR
Número anual de incidencias por valor de adq (x1000)	Nº/adq (x10⁶)	86,2	AQV
Número anual de incidencias por consulta	Nº/con(x1000)	1,4	CON
Número anual de incidencias por prueba de DIM	Nº/dim (x1000)	3,7	DIM
Número anual de incidencias por ingreso en urgencias	Nº/urg (x1000)	6,2	EME
Número anual de incidencias por ingreso hospitalariao	Nº/ing (x1000)	39,7	ADM
Número anual de incidencias por cirugía	Nº/cir (x1000)	71,8	SUR
Número anual de incidencias por cirugía ambulatoria	Nº/cir amb (x1000)	127,5	AMB
Número anual de incidencias por estancia	Nº/est (x1000)	12,0	STA

Tabla 27. Indicadores de número de incidencias

La tabla 28 muestra las ratios entre los recursos existentes y el uso que se hace de ellos por parte del paciente.

Indicadores	Unidades	EME	ADM	SUR	STA	VAR
Número anual pacientes por m²	Pacien./m²	4,0	0,6	0,3	2,0	ARE
Número anual pacientes por cama	Pacien./cama	427	67	37	221	BED
Número anual pacientes por quirófano	Pacien./qx	5.602	874	484	2.893	OPR
Número anual pacientes por pers. de enf.	Pacien./enf	364	57	31	188	NUR
Número anual pacientes por valor adquis.	Pacien./adq	13,9	2.200	1.200	7.200	AQV

Tabla 28. Ratios entre el número de pacientes y recursos

Los valores de referencia mostrados en las tablas anteriores permiten tener una visión de conjunto de la operativa y costes de mantenimiento partiendo de los datos de recursos. Por otro lado, las ratios de pacientes por los recursos disponibles caracterizan la operativa asistencial media del conjunto de hospitales.

4.3 Los datos de mantenimiento como fuente de información estratégica

4.3.1 Descripción de las bases de datos

En los siguientes apartados se describe la base de datos del equipamiento usada en el estudio desde el punto de vista de su funcionalidad, departamento al que pertenece y cobertura del contrato de mantenimiento.

En cuanto a la funcionalidad se analizan dos niveles de clasificación denominados familia y tipo. El proceso asistencial al que pertenecen los equipos se revisa a través del departamento, en la cual converge el procedimiento médico, la funcionalidad del equipo y la ubicación. El impacto del mantenimiento se analiza a través del alcance del contrato con el fin de valorar el nivel de cobertura y costes asociados. La valoración en todos los casos anteriores se realiza mediante el número de equipos y su valor de compra, se manera que se incorpora el enfoque operativo y el financiero.

4.3.1.1 Clasificación de equipamiento según familia

Se representan en la figura 30 el número de equipos analizados en función de las familias de electromedicina y diagnóstico por imagen.

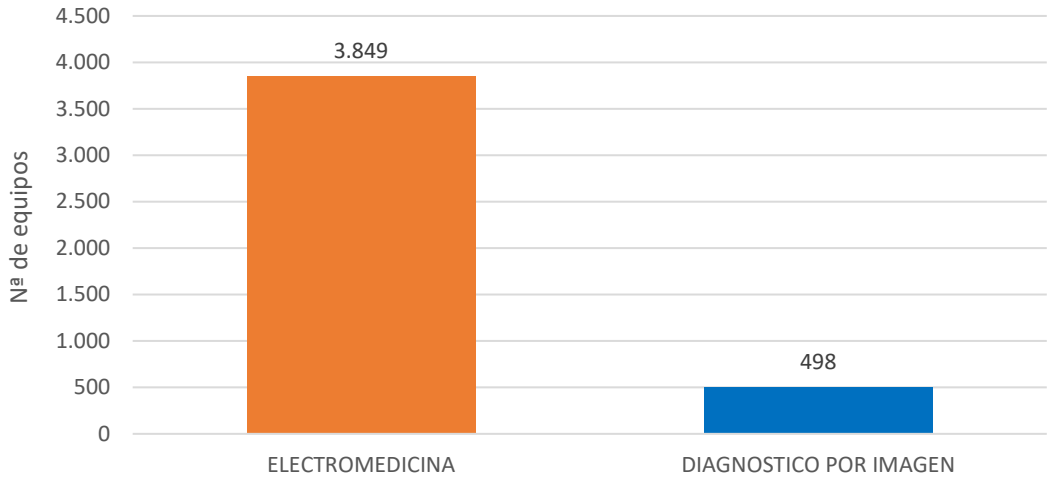


Figura 30. Número de equipos clasificados según la familia a la que pertenece

La familia de electromedicina (3.849) supone el 89% de la base instalada frente al 11% de diagnóstico por imagen. Esta gran diferencia se debe a la categorización utilizada, ya que la familia de electromedicina incluye todo dispositivo electromédico que no sea de diagnóstico por imagen. Esta división se realiza porque ambas categorías comparten características homogéneas: valor de compra unitario, movilidad del equipo, vida útil, nivel de obsolescencia, coste y alcance del contrato de mantenimiento, etc.

El valor de compra según la familia se muestra en la figura 31.

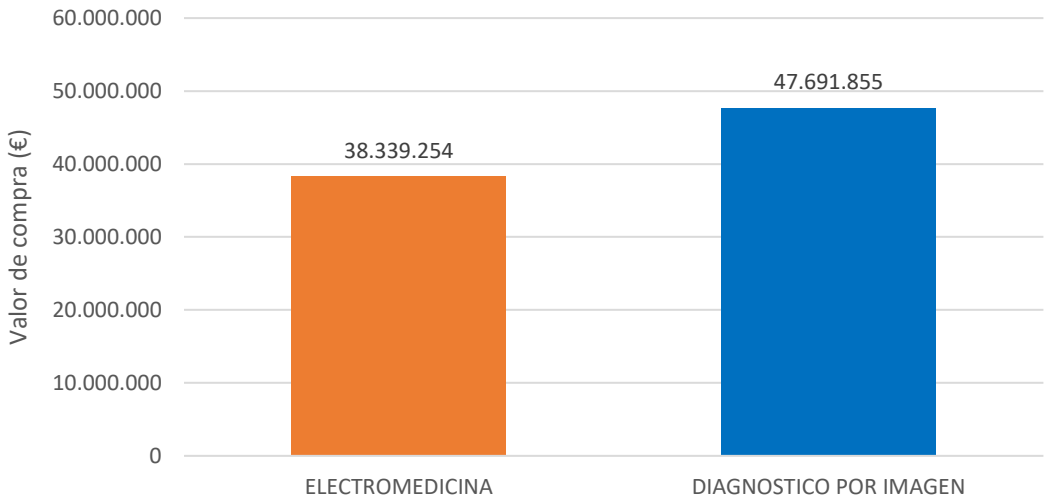


Figura 31. Valor de compra de equipos de electromedicina según familia

En el gráfico anterior se comprueba que el coste de compra de ambas familias se encuentra próximo al 50% del total. El equipamiento de diagnóstico por imagen tiene un valor alto comparado con la de electromedicina, a pesar de tener pocos equipos, debido a que el precio unitario de compra en esta familia es elevado.

En la figura 32 se puede observar la proporción de equipos por familia, según el número de componentes y valor de compra.

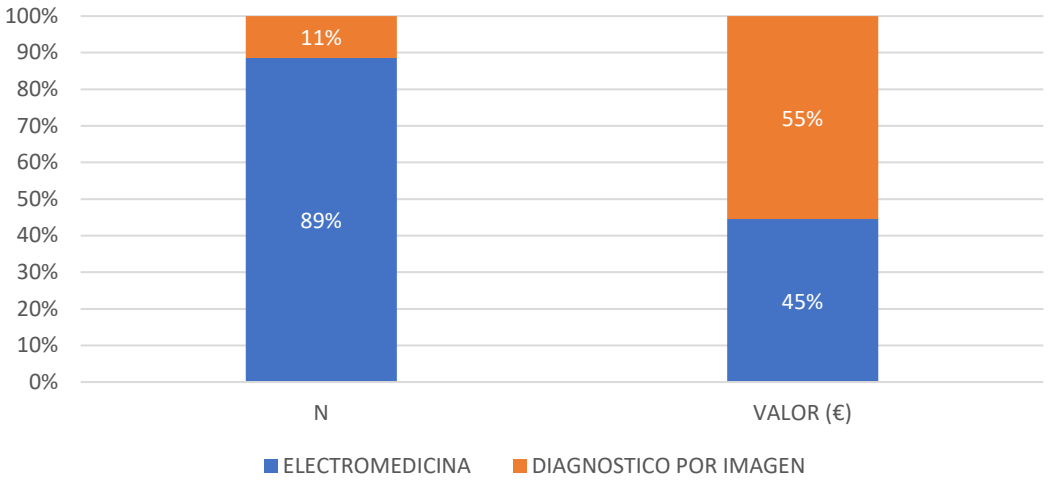


Figura 32. Proporción de Valor de compra de equipos según familia

El valor medio de compra de los equipos de electromedicina es de 9.961 € por equipo frente a los 95.767 € de diagnóstico por imagen, el cual tiene en proporción un coste 9,6 veces superior.

4.3.1.2 Clasificación del equipamiento según tipología

Las categorías analizadas a continuación hacen referencia a la funcionalidad del equipo, sin embargo, en muchos casos ésta coincide con el nombre de algún departamento o ubicación, ya que o bien es la función predominante o es la única en el proceso asistencial en el que participa. Por lo tanto, siempre que se hable de la tipología se está haciendo referencia a su funcionalidad. En el siguiente apartado se estudia la clasificación de la base de datos por departamento (o por proceso) que complementa a lo desarrollado en este apartado.

La clasificación utilizada en este trabajo proviene de la segmentación original de las bases de datos. Esta división no es única, ni hace referencia a ningún estándar, sino que responde a las necesidades particulares de agrupación de equipos hecha por el hospital. En la figura 33 se muestra la distribución de las 17 tipologías analizadas.

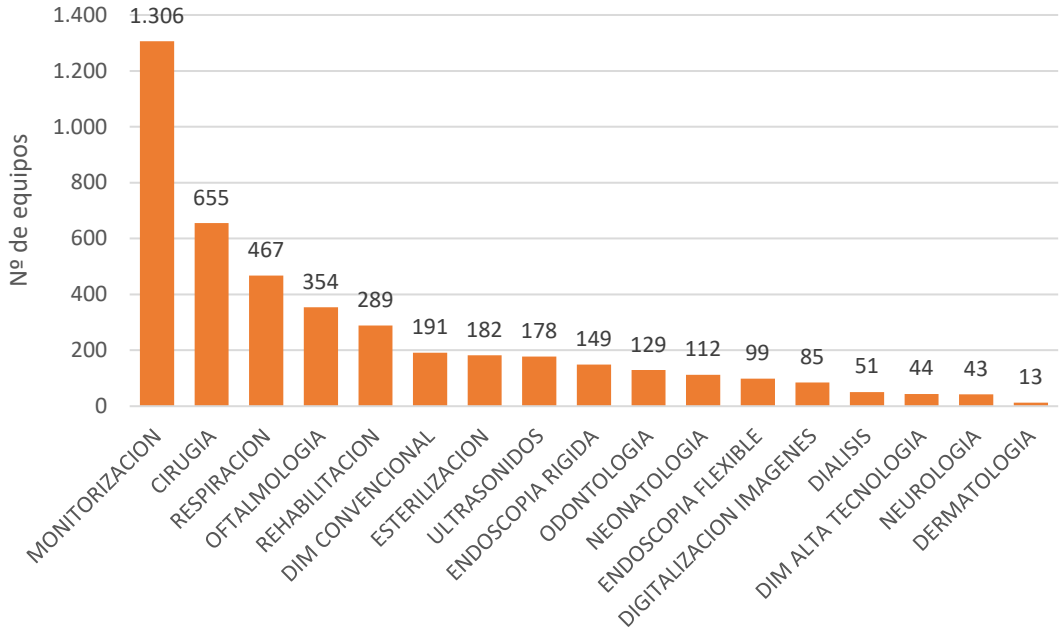


Figura 33. Número de equipos por tipología

La monitorización, cirugía y respiración son tipos que concentran una gran variedad de equipos, por lo que se pueden considerar categorías generales, ya que se encuentran presentes en muchos de los procedimientos. Por otro lado, se consideran tipologías de equipos de especialidades como oftalmología, diálisis, neurología o dermatología.

En las cinco primeras categorías se encuentran clasificados el 71% de todos los equipos, siendo la monitorización el 30% del total. El tipo con menor número de equipos es la dermatología (13).

En cuanto al valor de compra del equipamiento se muestra su distribución por tipos en la figura 34.

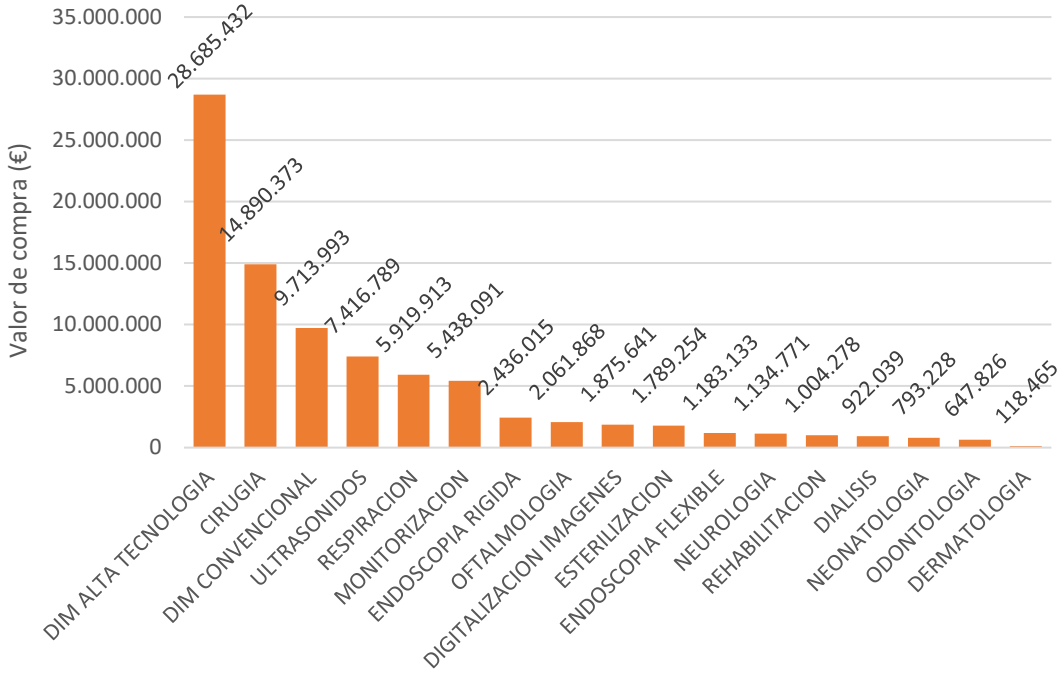


Figura 34. Valor de compra de los equipos por tipología

En este caso, se comprueba que las 4 primeras categorías suponen aproximadamente dos tercios del valor de compra de la base instalada (71%). Particularmente, el tipo con el valor más elevado es el de diagnóstico por imagen de alta tecnología (28.685.432 €), con un tercio de todos los costes y casi duplicando el valor del segundo tipo cirugía (14.890.373 €).

También se puede observar que tres de los cuatro primeros tipos se corresponden con equipos de la familia de diagnóstico por imagen, lo cual justifica los resultados presentados en la figura 31 en los que la familia DIM es la de mayor valor de compra. En el caso particular del equipamiento de alta tecnología para el diagnóstico por imagen el precio medio es de 651.942 €/equipo, ya que incluye máquinas de resonancia magnética, TACs o angiógrafos que tienen un precio unitario de compra muy elevado.

La monitorización aparece en el sexto lugar por valor de compra, cuando en la figura 33 se muestra que es la primera en cuanto al número de equipos. Esto se debe a que los dispositivos incluidos en esta categoría tienen un precio unitario relativamente bajo con respecto del resto (1.865 €/equipo). Ejemplos de esta categoría son monitores de constantes vitales, tensiómetros, pulsioxímetros o electrocardiógrafos. La categoría con menor valor de compra es el de dermatología (118.465 €), siendo su precio medio es de 9.113 €/equipo.

4.3.1.3 Clasificación del equipamiento según departamento

El departamento es una forma organizativa que incluye diferentes procedimientos para alcanzar sus objetivos. Se han considerado agrupaciones de tipo general, que incluyen otras de menor representatividad como por ejemplo mostradores, citación o *call-center* pertenecientes al departamento de consultas o análisis clínicos, anatomía patológica o investigación representados por el de laboratorio. En otros casos, responden a una función específica como UCI (de adultos o pediátrica), urgencias, oncología, hemodinámica o reproducción.

En la agrupación departamental no existe una separación clara entre las familias de electromedicina y diagnóstico por imagen, ya que muchos de los procesos utilizan dispositivos de las dos categorías. Lo que cambia de unos a otros es la proporción que existe entre ambos. Por ejemplo, el departamento de diagnóstico por imagen incluye preferentemente procesos de radiología, además de equipos de monitorización. En cambio, las UCIs tienen una importante proporción de equipos de respiración y monitorización, además de equipos portátiles de rayos x.

La distribución del número de equipos por departamento es la que se muestra en la figura 35.

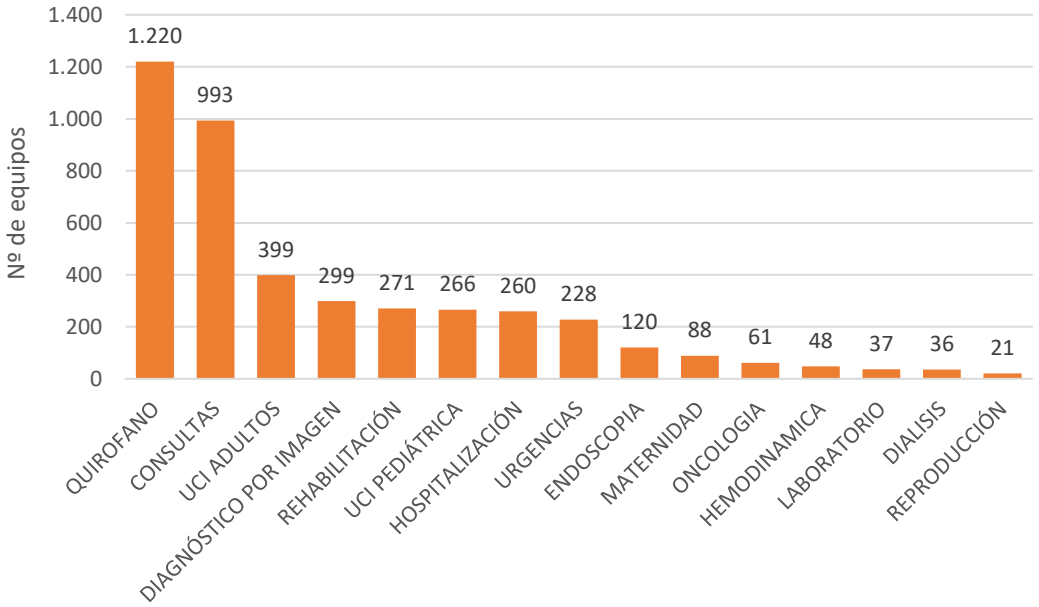


Figura 35. Número de equipos por departamento

El 73% de los equipos se encuentran incluidos en los cinco primeros departamentos: quirófanos, consultas, UCI de adultos, diagnóstico por imagen y rehabilitación. Particularmente, el quirófano tiene el 28% de los equipos (1.220), debido a la complejidad de los procedimientos que realizan.

De los 498 equipos tipificados como familia DIM, se comprueba que hay 199 dispositivos adscritos a otros departamentos distintos al de diagnóstico por imagen. Para el diagnóstico por imagen se demuestra que la clasificación funcional por familia o tipología queda distribuida en diferentes procesos a través de la división por departamentos.

El valor de compra de los equipos incluidos en cada departamento se presenta en la figura 36.

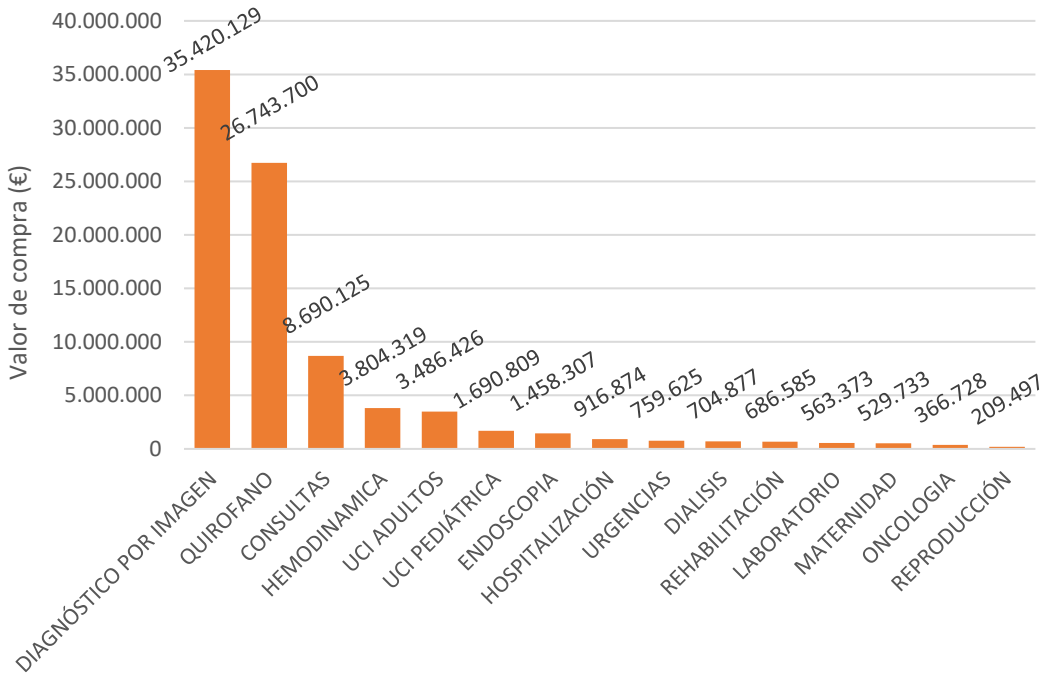


Figura 36. Valor de compra de los equipos por departamento

Las dos primeras categorías alcanzan el 72% del valor total de compra. El tercero en valor son las consultas. El departamento de diagnóstico por imagen supone el 41% del valor total (35.420.129 €), ya que es que mayor proporción de equipos de radiología posee y como se comprobó en los apartados anteriores son los equipos con mayor coste unitario.

Los quirófanos responden al segundo valor más alto (26.743.700 €). En este caso el importe total se justifica por la combinación del número de dispositivos (1.220) y su precio unitario medio (21.921 €), que es más del doble que el de la familia de electromedicina (9.961 €).

El departamento de consultas, con 8.690.125 €, es el tercero en valor de la base instalada, si bien es sensiblemente inferior a los dos primeros. En el resto de los departamentos se observan valores más bajos comparativamente con los anteriores.

4.3.1.4 Clasificación del equipamiento según tipo de contrato

El número de equipos por alcance del contrato, se muestra en la figura 37.

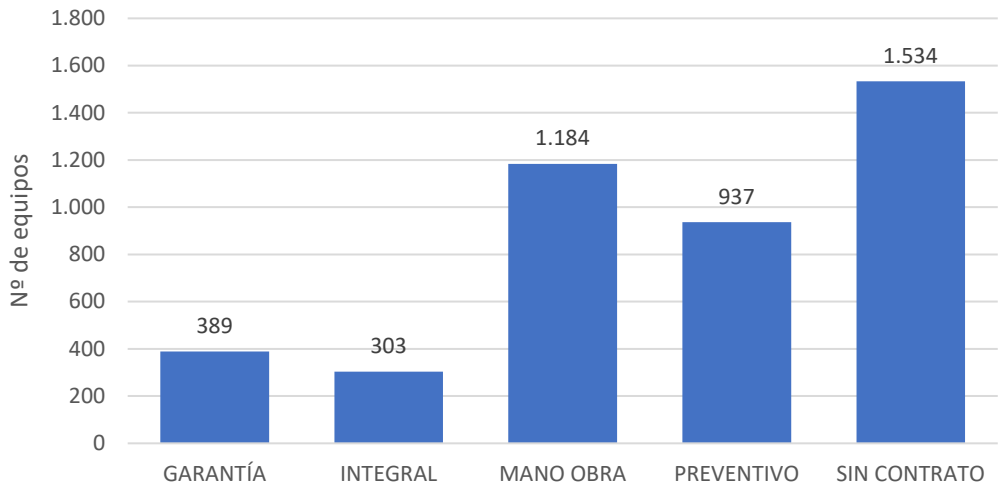


Figura 37. Número de equipos según alcance de contrato

No tienen contrato de mantenimiento el 35% de los equipos (1.534), por lo que cualquier incidencia que ocurra en estos dispositivos se atenderá bajo presupuesto. En función de los diferentes alcances se tiene la siguiente la clasificación: integral (303), mano de obra (1.184) y preventivo (937), los cuales suponen el 57% del total. La categoría en garantía es temporal, ya que pasado el periodo de cobertura pasará a alguno de los otros alcances.

Atendiendo al valor de compra se obtiene la figura 38.

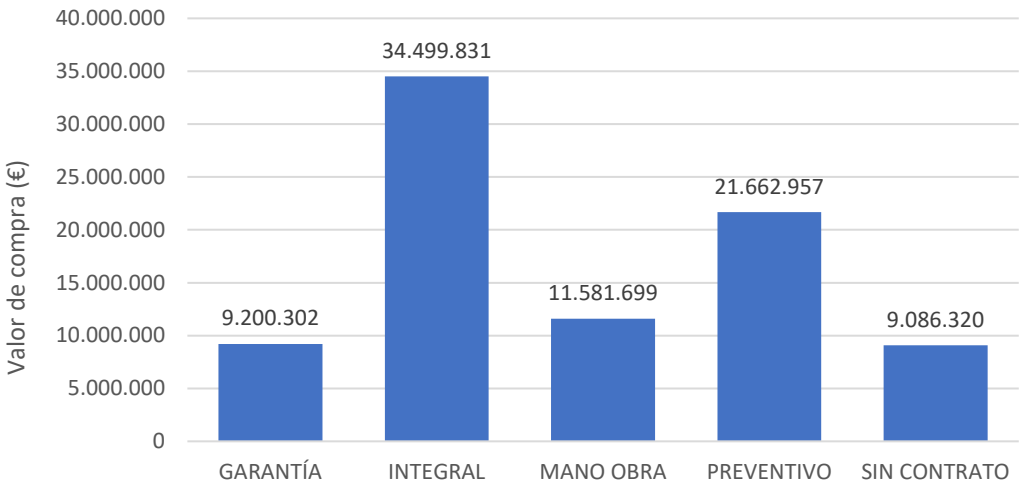


Figura 38. Valor de compra de los equipos según alcance de contrato

Se comprueba que según el valor de compra el 89% de los equipos tienen algún tipo de cobertura por contrato, siendo la principal la modalidad la cobertura integral con un 40%.

4.3.1.5 Evolución temporal del parque de equipos

En este estudio se analizan los equipos en uso o de alta en el inventario. No se han tenido en cuenta los equipos desechados o de baja a fecha de 31/12/2020, ya que aportarían información incorrecta para los indicadores que se basan en el periodo completo 2007-2020.

Para analizar la evolución temporal desde 2007 a 2020 se han considerado los equipos totales con los que se contaba en ese año, independientemente de que actualmente sean baja. En la figura 39 se muestra el gráfico con la serie temporal de los equipos instalados por año, incluyendo aquellos que han sido dados de baja en algún momento antes del 31/12/2020.

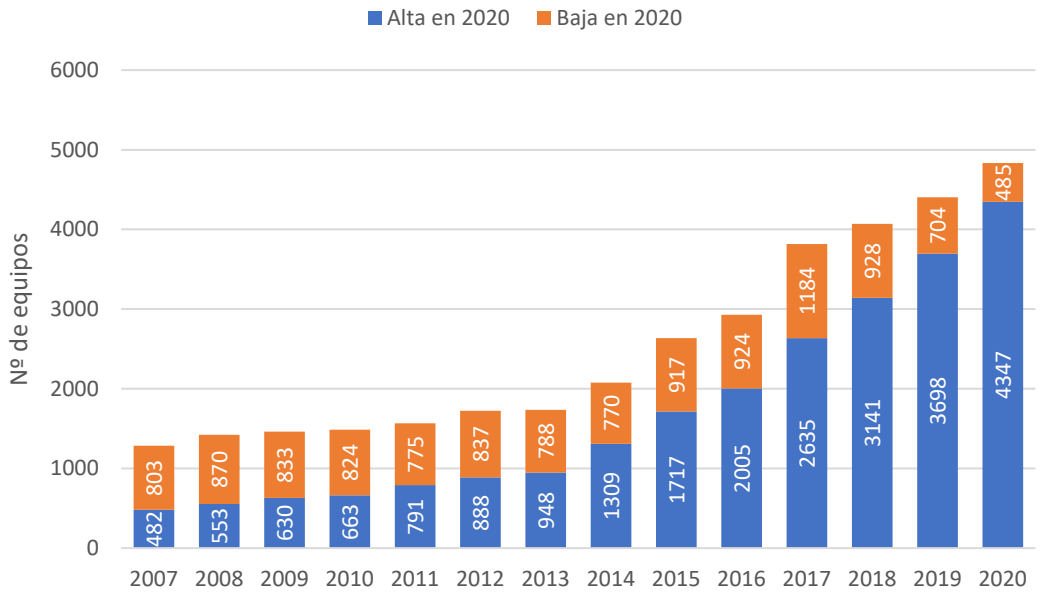


Figura 39. Evolución de base instalada de equipos entre 2007-2020

Se puede observar que el número de equipos evolucionó con un ligero crecimiento hasta 2013. En el segundo periodo de 2014 a 2020 se produce un crecimiento importante sostenido, hasta que en 2020 se triplica el número de dispositivos existentes en 2007.

Se comprueba que el número de bajas anuales se mantiene en el entorno de los 800 equipos hasta 2013, aumentando ligeramente hasta las 900-1.000 bajas/año en el periodo de 2014-2017 y un pequeño descenso en 2018-2019. El año 2020 tiene un dato atípico de bajas debido a que en el periodo de pandemia de Covid 19, no se han dado tantas bajas como otros años, además de que éstas suelen añadirse posteriormente al cierre del año.

Dado que el volumen de bajas anuales casi permanece constante en todo el periodo analizado, se comprueba que son las altas las que producen el aumento neto de la base instalada, debido a que el hospital aumenta la variedad y cantidad de equipos adquiridos. Se distinguen las dos pendientes del periodo del 2007-2013 y 2014-2020 identificadas en la figura 39.

La evolución temporal de los costes de mantenimiento y del valor de compra se muestra la figura 40. Las dos curvas tienen escalas diferentes reflejadas en los ejes derecho e izquierdo, coste del mantenimiento y valor de compra del equipamiento respectivamente.

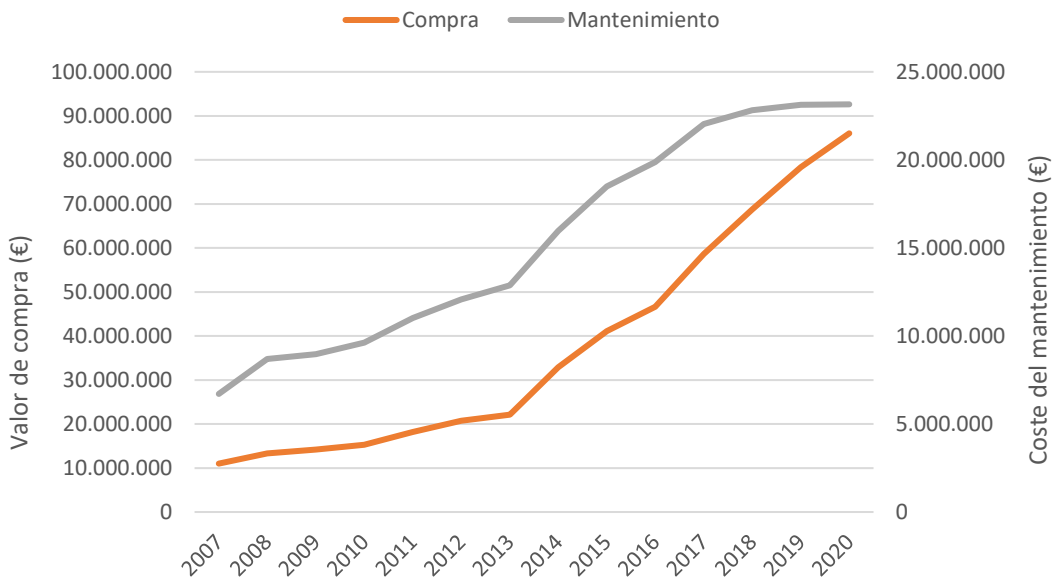


Figura 40. Evolución valor de compra del equipamiento y coste de mantenimiento

Se vuelven a identificar dos pendientes claramente diferenciadas correspondientes a los dos periodos de 2007-2013 y de 2014-2020. Ambas curvas tienen una forma parecida hasta 2017, donde la curva de mantenimiento comienza a aplanarse, a pesar de que la de valor de compra continúa con la pendiente del segundo periodo.

El hecho de que la curva de mantenimiento no crezca en el periodo de 2017-2020 y sí lo haga la del valor de compra implica que la ratio entre costes de mantenimiento y precio de compra se hace menor, lo que indica que se está realizando una importante gestión para la contención de costes y que el grupo de hospitales está consiguiendo sinergias a debido a un mayor de poder de negociación por volumen o relevancia en el mercado.

4.3.2 Descripción del modelo

En este apartado se describe la herramienta de análisis de las bases de datos para obtener los resultados del estudio. Se definen 2 cálculos: las métricas (o medidas) y los indicadores. La métrica es un cálculo que se hace sobre uno o varios campos fijos de un registro, por lo que es un resultado que nunca cambia, salvo que se actualice la matriz inicial de datos con nueva información. El indicador es una combinación lineal de métricas ajustada a través de unos parámetros. Es posible analizar agrupaciones de equipos por familia, tipología y departamento generando métricas e indicadores para el conjunto.

4.3.2.1 Definición de métricas

Los 4.347 equipos se caracterizan por un número calculado de uno o varios campos de las bases de datos de inventario, correctivos y contratos.

Se han definido 20 métricas aplicadas a cada equipo. En los cálculos en los que interviene el tiempo se usa como último día el 31/12/2020 (fin del estudio).

Métrica 1 (M1): Antigüedad

- Objetivo: Sirve para conocer el momento del ciclo de vida en el que se encuentra el equipo. Es una medida de la necesidad de renovación con posible aumento de costes de mantenimiento y tiempo de indisponibilidad.
- Base de datos usada: BD Inventario.
- Descripción del cálculo: Se resta la fecha fin del estudio de la de alta del equipo y se divide por 365.

$$\mathrm{M1} = \frac{\mathrm{F.Fin} - \mathrm{F.Alta}}{365} \qquad (24)$$

- Unidades: Años.
- Valores singulares: No existen.

Métrica 2 (M2): Número total de correctivos (desde el alta)

- Objetivo: Es un indicador de la robustez del equipo, intensidad de uso o de la adecuación de uso (relacionado con malos usos por parte del usuario).
- Base de datos usada: BD Correctivos.
- Descripción del cálculo: Se cuenta el número de intervenciones correctivas desde el momento en que dio de alta hasta la fecha fin del estudio.

$$\mathrm{M2} = \sum I.correctivas \qquad (25)$$

- Unidades: N correctivos.
- Valores singulares: No existen.

Métrica 3 (M3): Coste medio de correctivos (desde el alta)

- Objetivo: Es indicativo del coste de las reparaciones del equipo. Puede usarse como criterio de renovación o para cambiar de marca o modelo.
- Base de datos usada: BD Correctivos.
- Descripción del cálculo: Se divide el coste total de correctivos del equipo entre el número de intervenciones que ha tenido a lo largo de su vida.

$$\mathrm{M3} = \frac{\sum Coste\ correctivos}{\sum I.correctivas} \qquad (26)$$

- Unidades: € correctivos.
- Valores singulares: No existen.

Métrica 4 (M4): Número medio anual de correctivos

- Objetivo: Conocer la concentración o densidad anual de averías. Es indicativo de la robustez del equipo, intensidad de uso o malos usos.
- Base de datos usada: BD Inventario, BD Correctivos.
- Descripción del cálculo: Número de intervenciones correctivas dividido por la antigüedad del equipo (M1).

$$\mathrm{M4} = \frac{\sum I.correctivas}{\mathrm{M1}} \qquad (27)$$

- Unidades: N correctivos/ año.
- Valores singulares: No existen.

Métrica 5 (M5): Coste medio anual de correctivos

- Objetivo: Valorar el impacto económico anual de los correctivos. Se puede relacionar con contratos y con su alcance.
- Base de datos usada: BD Inventario, BD Correctivos.
- Descripción del cálculo: Se suma el coste de correctivos y se divide por la antigüedad y por el número de correctivos a lo largo de toda su vida.

$$\mathrm{M5} = \frac{\sum Coste\ correctivos}{M1 \cdot \sum I.correctivas} \qquad (28)$$

- Unidades: € correctivos/ año.
- Valores singulares: No existen.

Métrica 6 (M6): Número de correct. en último cuartil de antigüedad

- Objetivo: Comprobar si el número de averías aumenta en la última etapa de uso del equipo. Está relacionado con la obsolescencia del equipo y la identificación del final de su vida útil.
- Base de datos usada: BD Inventario, BD Correctivos.
- Descripción del cálculo: Se calcula la fecha de inicio del último cuartil. Se cuentan las incidencias ocurridas en ese periodo.

$$\mathrm{M6} = \sum I.correctivas\ (último\ cuartil) \qquad (29)$$

- Unidades: N correctivos del 4º cuartil.
- Valores singulares: No existen.

Métrica 7 (M7): Coste medio correct. en último cuartil de antigüedad

- Objetivo: Comprobar si el coste de correctivos aumenta en la última etapa de vida del equipo. Se intenta confirmar si el coste de los correctivos aumenta con el paso del tiempo, debido al envejecimiento.
- Base de datos usada: BD Inventario, BD Correctivos.
- Descripción del cálculo: Se divide el coste de todos los correctivos del último cuartil entre el número de incidencias que han ocurrido en el periodo.

$$\mathrm{M7} = \frac{\sum Coste\ correctivos\ (último\ cuartil)}{\sum I.correctivas\ (último\ cuartil)} \qquad (30)$$

- Unidades: € correctivos del 4º cuartil.
- Valores singulares: No existen.

Métrica 8 (M8): Coste total de correctivos/coste total contratos

- Objetivo: Comparar la proporción entre coste variable y coste fijo. Es indicativo de la adecuación del alcance del contrato y de la amortización y obsolescencia del equipo.
- Base de datos usada: BD Correctivos, BD Contratos.
- Descripción del cálculo: Se divide el coste total de correctivos (M2 x M3) entre el coste total de contratos.

$$\mathrm{M8} = \frac{\sum Coste\ correctivos}{\sum Coste\ contratos} \qquad (31)$$

- Unidades: Sin dimensión (porcentaje).
- Valores singulares: Si no existe contrato se asigna el valor -1.

Métrica 9 (M9): Número de correctivos anuales en equipos que tienen mantenimiento preventivo

- Objetivo: Se trata de valorar si el hecho de realizar mantenimientos preventivos influye en el número de incidencias correctivas anuales.
- Base de datos usada: BD Inventario, BD Correctivos, BD Contratos.
- Descripción del cálculo: Se divide el número medio anual de correctivos (M4) entre el número de preventivos anuales (solo equipos con preventivo)

$$\mathrm{M9} = \frac{\mathrm{M4}}{\sum Preventivos\ anuales} \qquad (32)$$

- Unidades: N correctivos/ nº preventivos.
- Valores singulares: Si no se realizan preventivos se asigna el valor -1.

Métrica 10 (M10): Coste del contrato anual frente al numero revisiones preventivas anuales

- Objetivo: Valorar el coste del contrato en función del número de revisiones preventivas realizadas.
- Base de datos usada: BD Inventario, BD Contratos.
- Descripción del cálculo: Coste anual del contrato dividido por el número de mantenimientos preventivos anuales.

$$\mathrm{M10} = \frac{\text{Coste contrato anual}}{\sum Preventivos\ anuales} \qquad (33)$$

- Unidades: € contrato/nº de preventivos.
- Valores singulares: Si no se realizan preventivos se asigna el valor -1.

Métrica 11 (M11): Tiempo máximo de solución de un correctivo

- Objetivo: Es una medida de la calidad del servicio y del tiempo de disponibilidad del equipo. Es un indicativo de la obsolescencia y la dificultad de mantenimiento de los elementos más antiguos.
- Base de datos usada: BD Correctivos.
- Descripción del cálculo: Es el tiempo de resolución máximo que ha tenido un equipo entre todas las incidencias atendidas.

$$\mathrm{M11} = \mathrm{MAX}\ (\text{Tiempo sol. correctivo}) \qquad (34)$$

- Unidades: Días de solución.
- Valores singulares: No existen.

Métrica 12 (M12): Tiempo medio de atención de una incidencia

- Objetivo: Valorar el servicio prestado por el proveedor a través del tiempo que tarda en iniciar la reparación desde que recibió el aviso. Influye en la indisponibilidad del equipo. Permite definir penalizaciones en el contrato.
- Base de datos usada: BD Correctivos.
- Descripción del cálculo: Se resta la fecha de inicio de cada reparación de la de recepción del aviso para cada incidencia. Se suman todos los tiempos y se divide por el número de correctivos.

$$\mathrm{M12} = \frac{\sum(F.inicio\ repar - F.recepción\ aviso)}{\sum I.correctivas} \quad (35)$$

- Unidades: Horas hasta atención/ Nº incidencias.
- Valores singulares: No existen.

Métrica 13 (M13): Tiempo medio de reparación por incidencia

- Objetivo: Mide la capacidad del mantenedor para realizar las reparaciones.
- Base de datos usada: BD Correctivos.
- Descripción del cálculo: Se resta la fecha de fin de reparación de la de inicio para cada incidencia, se suman todos los tiempos y se divide por el número de correctivos.

$$\mathrm{M13} = \frac{\sum(F.fin\ repar - F.inicio\ repar)}{\sum I.correctivas} \quad (36)$$

- Unidades: Días de reparación/ Nº incidencias.
- Valores singulares: No existen.

Métrica 14 (M14): Tiempo medio de solución por incidencia

- Objetivo: Valorar la capacidad técnica y de estructura que tiene un proveedor para resolver incidencias sobre los equipos que se le asignan.
- Base de datos usada: BD Correctivos.
- Descripción del cálculo: Se resta la fecha de fin de reparación de la de recepción del aviso para cada incidencia. Se suman todos los tiempos y se divide por el número de correctivos.

$$\mathrm{M14} = \frac{\sum(F.fin\ repar - F.recepción\ aviso)}{\sum I.correctivas} \quad (37)$$

- Unidades: Días de solución/ Nº incidencias.
- Valores singulares: No existen.

Métrica 15 (M15): Indisponibilidad anual

- Objetivo: Conocer el tiempo que el equipo no se puede usar durante el año. Tiene implicaciones en la operatividad del departamento en el que se encuentra asignado.
- Base de datos usada: BD Inventario, BD Correctivos.
- Descripción del cálculo: Se calcula el tiempo total de reparaciones del equipo (fecha de fin de reparación menos la fecha de recepción de aviso) y se divide por los años de antigüedad (M1).

$$\mathrm{M15} = \frac{\sum(F.fin\ repar - F.recepción\ aviso)}{\mathrm{M1}} \qquad (38)$$

- Unidades: Sin dimensión (porcentaje).
- Valores singulares: No existen.

Métrica 16 (M16): Coste anual del contrato/ valor compra equipo

- Objetivo: Valorar el coste anual del contrato en proporción al valor de compra. Es un indicativo del coste del contrato y una ayuda para la decisión de renovación del equipo.
- Base de datos usada: BD Inventario, BD Contratos.
- Descripción del cálculo: Coste anual del contrato dividido entre el valor de compra.

$$\mathrm{M16} = \frac{\text{Coste contrato anual}}{\text{Valor de compra}} \qquad (39)$$

- Unidades: Sin dimensión (porcentaje).
- Valores singulares: No existen.

Métrica 17 (M17): Coste total correctivos/valor compra equipo

- Objetivo: Comparar el coste de los correctivos y el valor de compra. Es indicador para la renovación, obsolescencia, robustez del equipo o malos usos por parte del usuario.
- Base de datos usada: BD Inventario, BD Correctivos.
- Descripción del cálculo: Se divide el coste total de correctivos entre el valor de compra.

$$\mathrm{M17} = \frac{\sum Coste\ total\ correctivos}{\text{Valor de compra}} \qquad (40)$$

- Unidades: Sin dimensión (porcentaje).
- Valores singulares: No existen.

Métrica 18 (M18): Coste total contrato/ valor compra equipo

- Objetivo: Es un indicador del coste del contrato a lo largo de la vida útil. Se valora el coste del contrato de forma relativa. Indirectamente permite analizar el alcance del contrato.
- Base de datos usada: BD Inventario, BD Contratos.
- Descripción del cálculo: Se divide el coste total del contrato entre el valor de compra.

$$\mathrm{M18} = \frac{\sum Coste\ total\ contratos}{\text{Valor de compra}} \qquad (41)$$

- Unidades: Sin dimensión (porcentaje).
- Valores singulares: No existen.

Métrica 19 (M19): Coste total de mantenimiento/ valor compra equipo

- Objetivo: Compara el coste total de mantenimiento y el valor de compra. Permite analizar la posible renovación del equipo y alcance del contrato.
- Base de datos usada: BD Inventario, BD Correctivos, BD Contratos.
- Descripción del cálculo: Coste total de mantenimiento (coste de contratos más correctivos), dividido entre el valor de compra.

$$\mathrm{M19} = \frac{\sum Coste\ contratos + \sum Coste\ correctivos}{\text{Valor de compra}} \qquad (42)$$

- Unidades: Sin dimensión (Porcentaje).
- Valores singulares: No existen.

Métrica 20: Coste de la indisponibilidad

- Objetivo: Se relaciona el tiempo de la indisponibilidad (suma de todo el tiempo en el que el equipo no se puede usar) con el coste de los correctivos. Es un indicador de reparaciones costosas, cuando el tiempo de reparación permanece constante.
- Base de datos usada: BD Inventario, BD Correctivos.
- Descripción del cálculo: Coste total de correctivos dividido entre tiempo indisponibilidad.

$$\mathrm{M20} = \frac{\sum Coste\ correctivos}{\sum(F.fin\ repar - F.recepción\ aviso)} \qquad (43)$$

- Unidades: € correctivos/ (días indisponibilidad).
- Valores singulares: Si no se realizan preventivos se asigna el valor -1.

4.3.2.2 Definición de tramos

El tramo es el primer nivel de parametrización del modelo para construir los indicadores. A diferencia de la métrica que una vez definida siempre asigna el mismo resultado por equipo, el tramo al que pertenece depende de la elección de unos valores particulares. Para cada métrica se define un criterio de exclusión (NA) y se fijan tres valores de referencia (V1, V2, V3). De esta manera se pueden construir cinco tramos (T0, T1, T2, T3, T4).

- T0 (NA): Es el tramo de los equipos que quedan excluidos por definición de la propia métrica.
- T1<=V1: Equipos con métrica inferior al valor de referencia V1. En la mayoría de los casos este tramo tiene como cota inferior el cero. El valor nulo suele coincidir con el motivo de exclusión, aunque no tiene que ser así siempre, ya que depende de la definición de la propia métrica.
- V1<T2<=V2: Equipos con valor de métrica comprendido entre los valores V1 y V2.
- V2<T3<=V3: Equipos con valor de métrica comprendido entre los valores V2 y V3.
- V3<T4: Equipos cuya métrica es superior al valor V3.

Cada uno de los 4.347 equipos de la base de datos quedará asignado a un determinado tramo para cada una de las 20 métricas, es decir, el registro queda caracterizado por un vector de 20 valores, en el que cada elemento indicará el tramo en el que se encuentra la medida.

Los valores de referencia descritos es las siguientes tablas son parámetros del modelo y por lo tanto son modificables a criterio de quien configure la herramienta. Si cambia la parametrización, se modifica el vector de métricas asociado a cada equipo.

Particularmente, en este estudio la selección de valores se ha realizado con el apoyo de los histogramas de distribución de los valores de las métricas. La selección de los valores V1, V2 y V3 se realiza a través del conocimiento de las características particulares de los hospitales analizados, por lo que el trasladado o uso de estos parámetros a otros centros se debe valorar si se adecúa a sus nuevas circunstancias y resto de información complementaria.

De la figura 41 a la 60 se presentan los histogramas, los valores de referencia y los criterios de exclusión elegidos para métrica. El histograma no incluye el tramo T0.

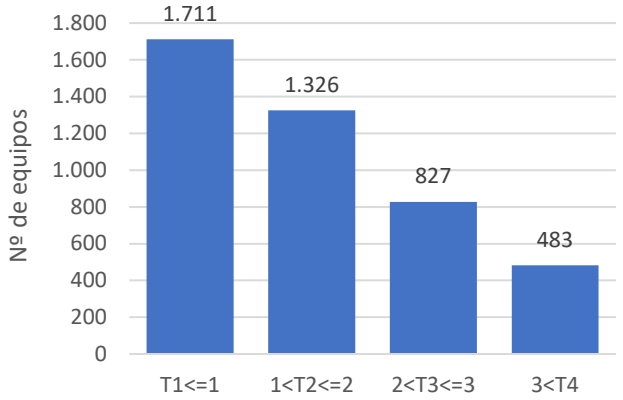
M1	Antigüedad	
Exclusiones	**NA**	No existen exclusiones
Valores de referencia	**1**	3 años de antigüedad
	2	6 años de antigüedad
	3	13 años de antigüedad
Gráfico		

Figura 41. Valores de referencia de la antigüedad (M1)

Se observa que la mayoría de los equipos tienen una antigüedad inferior a 3 años (1.711), seguidos por el tramo de 3 a 6 años (1.326). Hay 483 equipos con más de 13 años. El nivel de obsolescencia global se puede considerar bajo.

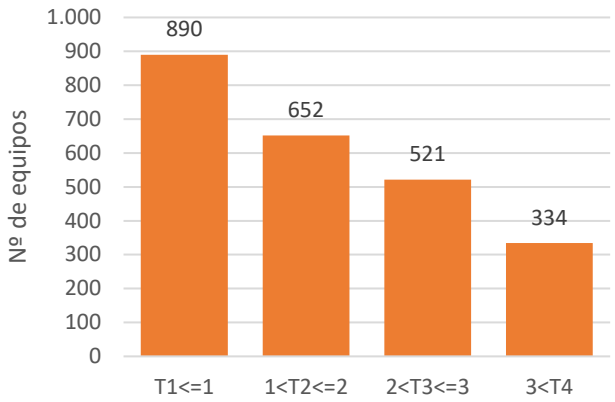
M2	Número de correctivos (desde el alta)	
Exclusiones	**NA**	1.950 equipos que no han tenido correctivos
Valores de referencia	**1**	2 correctivos a lo largo de la vida del equipo
	2	6 correctivos a lo largo de la vida del equipo
	3	15 correctivos a lo largo de la vida del equipo
Gráfico		

Figura 42. Valores de referencia de número de correctivos (desde el alta) (M2)

Se observa que el 45% de los equipos nunca se han averiado (1.950). De los que sí han tenido reparaciones (2.397) el grupo mayoritario es el que solo han tenido 2 intervenciones (890 equipos). También se comprueba que existen 334 equipos con más de 15 intervenciones a lo largo de su vida.

M3	Coste medio de correctivos (desde el alta)	
Exclusiones	**NA**	2.410 equipos sin coste de correctivo
Valores de referencia	**1**	200 €
	2	400 €
	3	1.000 €
Gráfico		

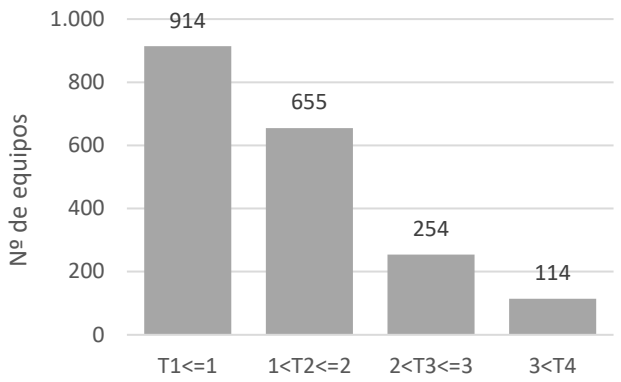


Figura 43. Valores de referencia de coste medio de correctivos (desde el alta) (M4)

No han tenido costes correctivos 2.410 equipos. En estos se encuentran incluidos tanto los 1.950 que nunca tuvieron reparaciones como los 460 que, habiendo tenido averías, su coste estaba incluido en el alcance del contrato. La mayor parte de los equipos tienen un coste medio de reparación de 200 €. El grupo con más de 400 €/equipo supone el 19% de total con coste.

M4	Número medio anual de correctivos	
Exclusiones	**NA**	1.950 equipos sin correctivos
Valores de referencia	**1**	1 Correctivo /año
	2	2 Correctivos /año
	3	6 Correctivos /año
Gráfico		

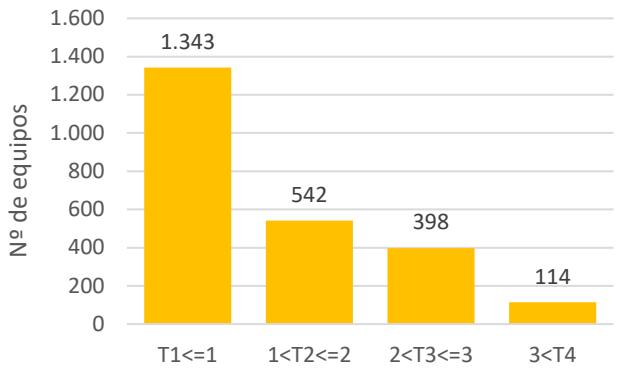


Figura 44. Valores de referencia de número medio anual de correctivos (M4)

La gran mayoría de equipos con incidencias solo tienen una intervención al año (1.343), lo que supone el 56%. Por lo tanto, se deben vigilar principalmente los 114 equipos con más de 6 intervenciones al año por si la causa se debe a obsolescencia, malos usos o baja calidad del equipo.

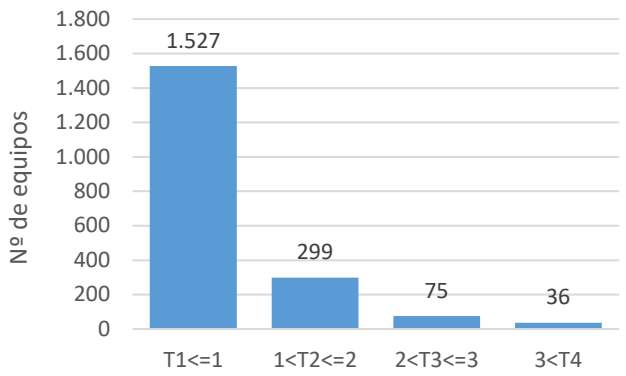
M5	Coste medio anual de correctivos	
Exclusiones	**NA**	2.410 equipos sin coste de correctivo
Valores de referencia	**1**	100 €
	2	250 €
	3	500 €
Gráfico		

Figura 45. Valores de referencia de coste medio anual de correctivos (M5)

Se comprueba que la mayoría de los equipos tienen un coste medio anual de menos de 100 €. Son pequeñas intervenciones de reposición de material o de fallos simples. Existen pocos equipos con más de 500 € por reparación. En estos últimos se debe valorar su inclusión en un contrato o aumentar el alcance del mismo.

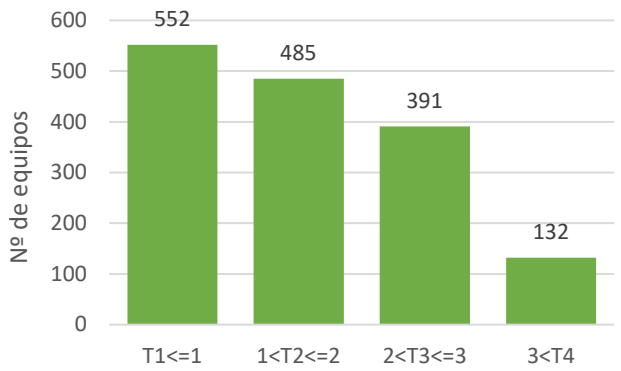
M6	Número de correctivos en último cuartil	
Exclusiones	**NA**	2.787 equipos sin correctivos en su último cuartil
Valores de referencia	**1**	1 correctivo/ último cuartil
	2	3 correctivo/ último cuartil
	3	10 correctivo/ último cuartil
Gráfico		

Figura 46. Valores de referencia de número de correctivos en último cuartil (M6)

Se observa que el 64% (2.787) de todos los equipos no han tenido intervenciones correctivas en el último cuartil de antigüedad. Se analizan los equipos del tramo entre 3 y 10 intervenciones (391), para identificar las causas de las averías. El último grupo, con más de 10 correctivos (132), es probable que se encuentren en obsolescencia.

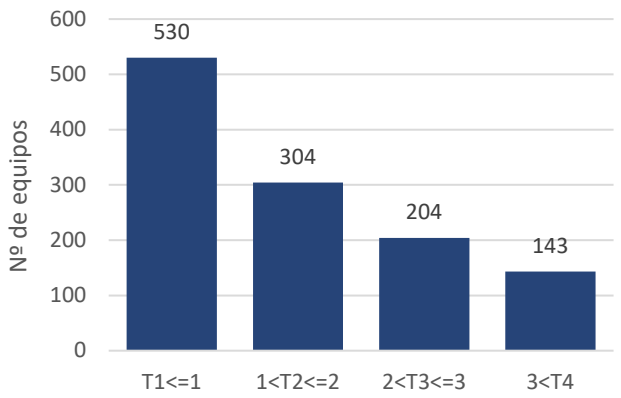
M7	Coste medio de correctivos en último cuartil	
Exclusiones	**NA**	3166 equipos sin coste correctivo en último cuartil
Valores de referencia	**1**	200 €
	2	350 €
	3	600 €
Gráfico		

Figura 47. Valores de referencia de coste medio de correctivos en último cuartil (M7)

No han tenido coste de reparación en el último cuartil el 73% de los equipos. La gran mayoría de los equipos han tenido reparaciones por importe inferior a 200 €. Para los de más de 600 € se debe valorar si estas se producen por envejecimiento.

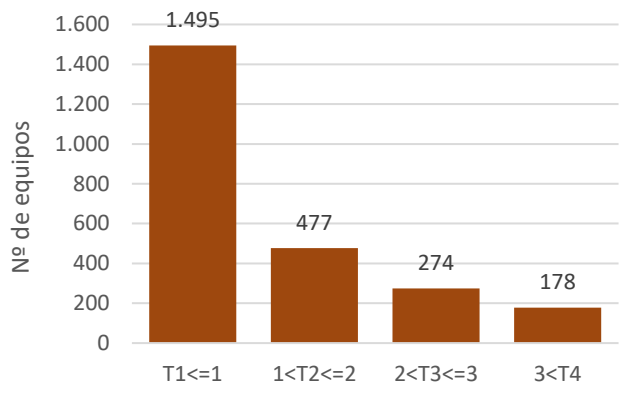
M8	Coste total de correctivos/coste total contratos	
Exclusiones	**NA**	1.923 equipos sin contrato
Valores de referencia	**1**	5%
	2	30%
	3	100%
Gráfico		

Figura 48. Valores de referencia de coste total de correctivos/coste total contratos (M8)

Se observa que el 44% de los equipos no tiene contrato (1.923). El resto de equipos tiene un porcentaje bajo de coste de reparaciones frente al valor del contrato (1.495). No obstante, habría que valorar si tienen una sobre cobertura de contrato. De forma similar se debe valorar sin los equipos en los que se gasta más dinero en correctivos que el contrato (178), tienen un alcance adecuado.

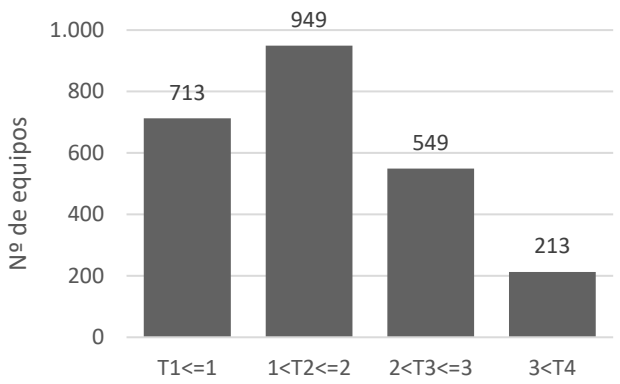
M9	Número de correctivos anuales equipos con preventivos	
Exclusiones	**NA**	1.923 equipos sin contrato
Valores de referencia	**1**	0 correctivos
	2	1 correctivos
	3	3 correctivos
Gráfico		

Figura 49. Valores de referencia de nº correctivos anuales equipos con preventivos (M9)

El número de preventivos debería minimizar el número de correctivos. En este caso no se produce esta relación, ya que el grupo más numeroso es el que tiene 1 correctivo (949). Esta relación es difícil de apreciar, ya que es el fabricante el que marca el número de preventivos anuales.

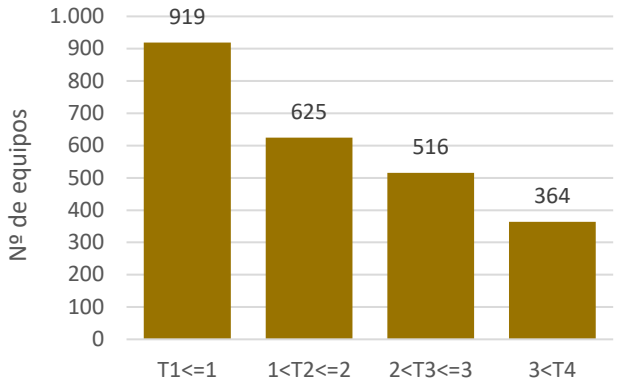
M10	Coste contrato anual/ nº revisiones preventivas año	
Exclusiones	**NA**	1.923 equipos sin contrato
Valores de referencia	**1**	200 €
	2	400 €
	3	900 €
Gráfico		

Figura 50. Valores de referencia de coste contrato anual/ nº revisiones preventivas (M10)

Se observa que el 64% de los equipos tienen un coste anual de contrato por preventivo realizado inferior a los 400 €.

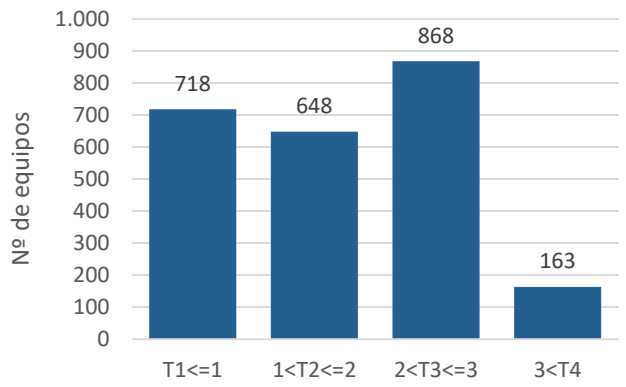
M11	Tiempo máximo de solución de un correctivo	
Exclusiones	**NA**	1.950 equipos sin correctivos
Valores de referencia	**1**	5 días
	2	21 días
	3	31 días
Gráfico		

Figura 51. Valores de referencia de tiempo máximo de solución de un correctivo (M11)

Se comprueba que el 57% de los equipos (1.366) han tenido en alguna reparación un tiempo máximo de resolución de 21 días. Esta métrica valora la calidad del servicio del mantenedor y la dificultad que puede tener para resolver determinadas incidencias.

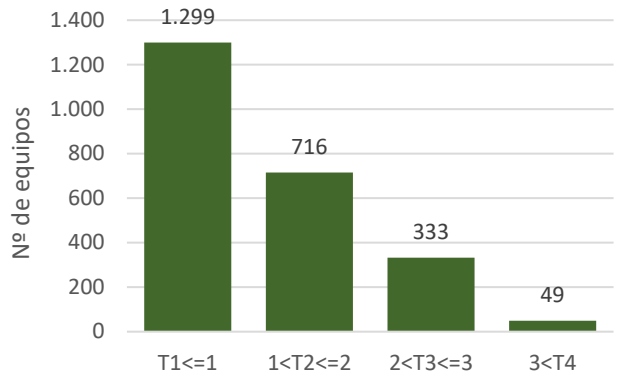
M12	Tiempo medio de atención de una incidencia	
Exclusiones	**NA**	1.950 equipos sin correctivos
Valores de referencia	**1**	9 horas
	2	18 horas
	3	28 horas
Gráfico		

Figura 52. Valores de referencia de tiempo medio de atención de una incidencia (M12)

La mayoría de las incidencias son comunicadas al proveedor en el mismo turno o en el día siguiente. Hay cuatro personas que de forma centralizada tramitan incidencias para que la avería sea informada al mantenedor lo antes posible.

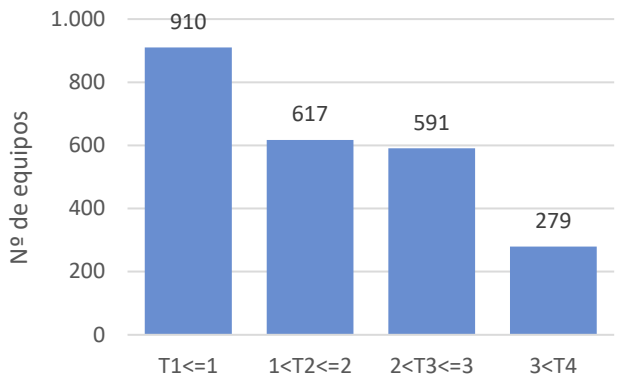
M13	Tiempo medio de reparación por incidencia	
Exclusiones	**NA**	1.950 equipos sin correctivos
Valores de referencia	**1**	3 días
	2	7 días
	3	14 días
Gráfico		

Figura 53. Valores de referencia de tiempo medio de reparación por incidencia (M13)

Es una de las métricas clave para valorar el desempeño del mantenedor. El 38% de las averías se resuelven en menos de 3 días. Este porcentaje aumenta hasta el 64% si se consideran las resueltas en menos de 7 días. Tienen especial relevancia las 279 con tiempo de resolución superior a 14 días, pues puede deberse a falta de capacidad del proveedor u obsolescencia y falta de recambios.

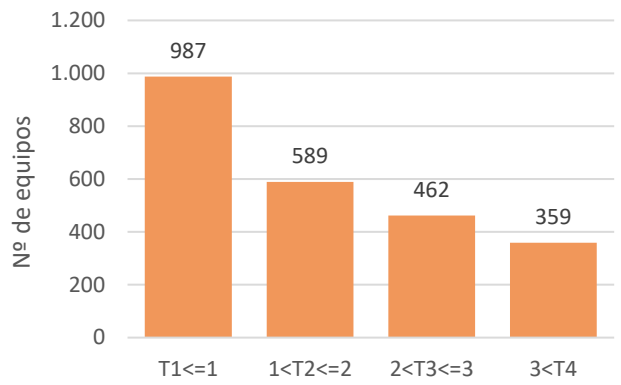
M14	Tiempo medio de solución por incidencia	
Exclusiones	**NA**	1.950 equipos sin correctivos
Valores de referencia	**1**	4 días
	2	8 días
	3	13 días
Gráfico		

Figura 54. Valores de referencia de tiempo medio de solución por incidencia (M14)

Esta métrica es suma de la M12 y M13. Dado que el aporte de M12 es pequeño, su comportamiento es parecido a la M13. El 66% de las incidencias son resueltas en menos de 8 días. El 15% de las averías tienen un tiempo de resolución superior a 13 días.

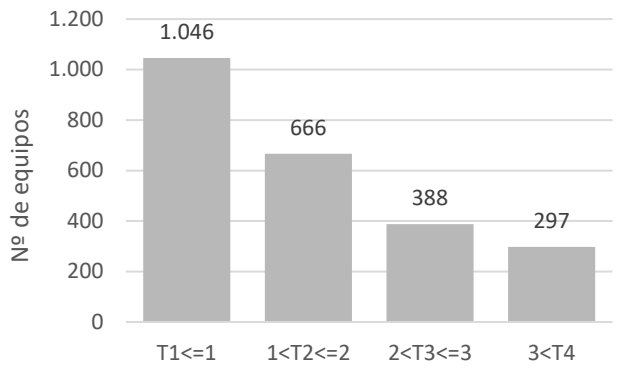
M15	Indisponibilidad anual	
Exclusiones	**NA**	1.950 equipos sin correctivos
Valores de referencia	**1**	1%
	2	3%
	3	6%
Gráfico		

Figura 55. Valores de referencia de indisponibilidad anual (M15)

Se observa que el 44% de las incidencias producen una indisponibilidad anual inferior al 1%. Por otro lado, el 12% de averías (297) suponen tiempos de parada superiores al 6%, por lo que debe comparar con la pérdida de facturación de estos equipos y valorar si es necesario actuar sobre el contrato o renovación.

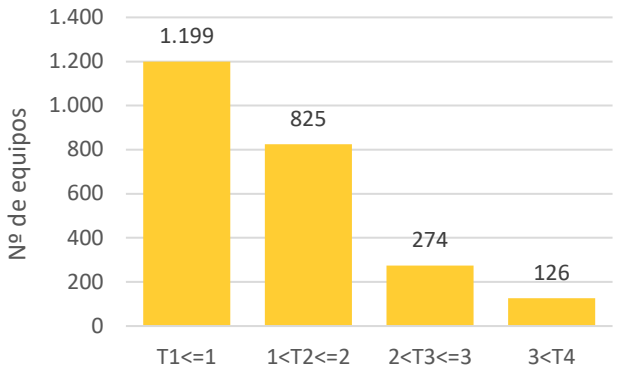
M16	Coste anual del contrato/ valor compra equipo	
Exclusiones	**NA**	1.923 equipos sin contrato
Valores de referencia	**1**	5%
	2	10%
	3	15%
Gráfico		

Figura 56. Valores de referencia de coste anual contrato/ valor compra equipo (M16)

Esta métrica es relevante para la negociación del contrato y su alcance. El 49% de los equipos tienen un coste de contrato anual inferior al 5% del valor de compra. Este porcentaje aumenta hasta el 83% si se considera un coste anual de contrato inferior al 10% Por encima del 10% se esperarían contratos de alta tecnología en sus primeros años de contratación.

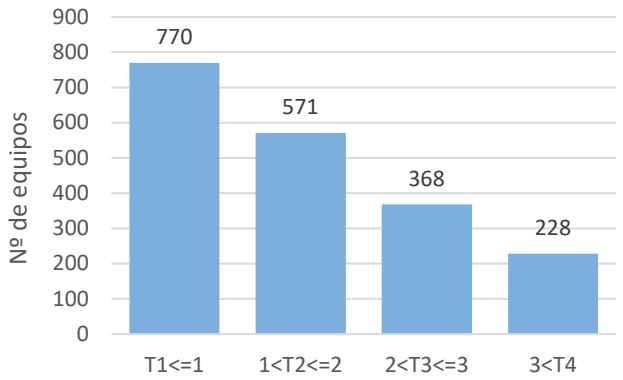
M17	Coste total correctivos/valor compra equipo	
Exclusiones	**NA**	2.410 equipos sin coste de correctivo
Valores de referencia	**1**	10%
	2	30%
	3	70%
Gráfico		

Figura 57. Valores de referencia de coste total correctivos/valor compra equipo (M17)

El coste de correctivos que no superan el 10% respecto del valor de compra se corresponde con el 40% del total. Por tanto, se deben analizar el 12% de equipos (228) cuya ratio supera el 70%, ya que puede ser indicativo de un alcance de contrato inadecuado.

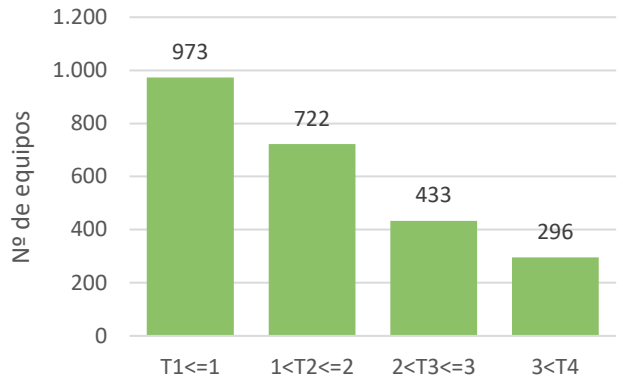
M18	Coste total contrato/ valor compra equipo	
Exclusiones	**NA**	1.923 equipos sin contrato
Valores de referencia	**1**	10%
	2	30%
	3	60%
Gráfico		

Figura 58. Valores de referencia de coste anual contrato/ valor compra equipo (M18)

Es un indicador que valora el coste del contrato desde la compra del equipo. Hay 296 equipos con un valor superior al 60%, que deben ser analizados para confirmar si el precio del contrato es el correcto o está sobrevalorado.

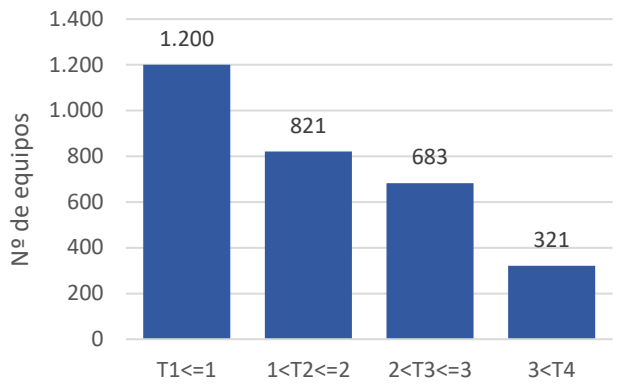
M19	Coste total mantenimiento/ valor compra equipo	
Exclusiones	**NA**	1.322 equipos sin coste de mantenimiento
Valores de referencia	**1**	15%
	2	40%
	3	100%
Gráfico		

Figura 59. Valores de referencia de coste total mantenimiento/ valor compra equipo (M19)

El 30% de los equipos nunca se han averiado, por lo tanto, no han tenido costes de mantenimiento (1.322). 1.200 equipos tienen una ratio de coste de mantenimiento frente al valor de compra del 15%. Por otro lado, 321 tienen un coste total superior al valor de compra. Estos últimos deben ser analizados detalladamente por si estuvieran en periodo de obsolescencia o el contrato no tiene la cobertura suficiente.

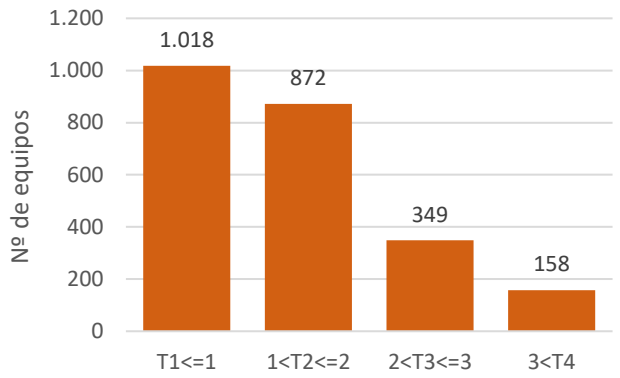
M20	Coste de la indisponibilidad	
Exclusiones	**NA**	1.950 equipos sin correctivos
Valores de referencia	**1**	20 €/día
	2	100 €/día
	3	300 €/día
Gráfico		

Figura 60. Valores de referencia de coste de la indisponibilidad (M20)

Es un parámetro difícil de valorar porque influye de forma simultánea el coste de la reparación y en el tiempo de resolución. Se observa que el 42% de los equipos tienen un coste inferior a los 20 €/día. Solo el 7% superan los 300 €/día.

En casi todos los histogramas se observa un patrón similar en el que el número de equipos contenidos en cada tramo (T1, T2, T3, T4) es menor que en el anterior. De esta forma una gran parte de los dispositivos aparece en los dos primeros tramos (T1 y T2).

Los tramos T3 y T4 son los que tendrán una mayor penalización en los indicadores, ya que pueden indicar obsolescencia, bajo nivel de servicio, falta de capacidad del proveedor para mantener el equipo, baja calidad del equipo, alcance inadecuado del contrato, equipo poco robusto, malos usos por parte del usuario, envejecimiento prematuro, alta rotación de compra.

En cuanto al tramo T0 o criterio de exclusión se ha identificado en la muestra analizada unas cantidades que se repiten en diversas métricas. Son valores con significado en la operativa y contrato:

- Aparecen 1.950 equipos que nunca han tenido una intervención correctiva, independientemente de si tienen contrato o no, o del número de preventivos.
- Existen 2.410 equipos sin coste de intervención, desglosado a su vez en los 1950 que no han tenido intervenciones y 460 cuyo coste estaba incluido en el alcance del contrato.
- Hay 1.923 equipos que no tienen contrato.

En las tablas 29 y 30 quedan resumidos valores de referencia para la definición de tramos para cada una de las métricas.

	M1	**M2**	**M3**	**M4**	**M5**	**M6**	**M7**	**M8**	**M9**	**M10**
NA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V1	3	2	200	1	100	1	200	5%	0	200
V2	6	6	400	2	250	3	350	30%	1	400
V3	13	15	1000	6	500	10	600	100%	3	900

Tabla 29. Resumen de valores de referencia de tramos para la métrica M1-M10

	M11	**M12**	**M13**	**M14**	**M15**	**M16**	**M17**	**M18**	**M19**	**M20**
NA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V1	5	9	3	4	1%	5%	10%	10%	15%	20
V2	21	18	7	8	3%	10%	30%	30%	40%	100
V3	31	48	14	13	6%	15%	70%	60%	100%	300

Tabla 30. Resumen de valores de referencia de tramos para la métrica M11-M20

4.3.2.3 Definición de indicadores

Una vez calculadas las métricas y definidos los tramos, cada equipo queda caracterizado por los siguientes vectores:

Vector de métricas: Mj (j=1…20) valores calculados para cada métrica. Son números reales, por lo que pueden adoptar cualquier valor.

$$M = (M1, M2, M3,\ldots, Mj,\ldots, M20) \tag{44}$$

Vector de tramos: TRj (j=1…20) valor del tramo correspondiente a cada métrica. Cada componente del vector puede adoptar 5 valores: T0, T1, T2, T3, T4

$$TR = (TR1, TR2, TR3,\ldots, TRj,\ldots, TR20) \tag{45}$$

Basado en la información del vector de tramos TR, se puede generar un nuevo vector asociado a cada equipo denominado indicador IN.

$$IN = (I1, I2, I3,\ldots, Ij,\ldots, I20) \tag{46}$$

donde cada componente Ij se define como:

$$I_j = c_j \cdot r_k \tag{47}$$

donde c_j es la contribución de la métrica j y r_k es el peso del tramo (k=1…5).

Además, se deben cumplir las siguientes restricciones.

$$0 \leq c_j \leq 1 \qquad \sum_{j=1}^{20} c_j = 1 \qquad 0 \leq r_k \leq 1 \tag{48}$$

El indicador del equipo se define como la suma de sus componentes.

$$\sum_{j=1}^{20} I_j = IND \tag{49}$$

En este estudio se han definido 5 indicadores IND_i (i=1..5) denominados obsolescencia (IND1), nivel de servicio (IND2), contrato (IND3), incidencias correctivas (IND4) y coste de mantenimiento (IND5).

Las tablas 31 y 32 muestran los valores de c_j y r_k para la parametrización del modelo a través de 5 indicadores:

	Métricas																			
c_j (%)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
IND1	25	10	10			20	20								5				10	
IND2				10		15					5			35	35					
IND3								20	20	5						35			20	
IND4	20	35				20			10						15					
IND5		20										15	15		20			10	20	

Tabla 31. Parámetros de cada métrica e indicador

	Tramos				
r_k (%)	NA	T1<=1	1<T2<=2	2<T3<=3	3<T4
IND1	0%	0%	10%	50%	100%
IND2	0%	0%	10%	50%	100%
IND3	0%	0%	10%	50%	100%
IND4	0%	0%	10%	50%	100%
IND5	0%	0%	10%	50%	100%

Tabla 32. Parámetros de cada tramo e indicador

En las tablas de la 33 a la 37 se obtienen los valores I_{ij} de cada equipo en función de la métrica (j=1…20), tramo (k=1…5) e indicador (i=1…5)

	IND1: Obsolescencia																			
I_j (%)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T0																				
T1																				
T2	3	1	1			2	2								1				1	
T3	13	5	5			10	10								3				5	
T4	25	10	10			20	20								5				10	

Tabla 33. Valores del indicador de obsolescencia (IND1) según métrica y tramo

	IND2: Nivel de servicio																			
I_j (%)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T0																				
T1																				
T2				1		2					1			4	4					
T3				5		8					3			18	18					
T4				10		15					5			35	35					

Tabla 34. Valores del indicador de nivel de servicio (IND2) según métrica y tramo

	IND3: Alcance del contrato																			
I_j (%)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T0																				
T1																				
T2								2	2	1						4			2	
T3								10	10	3						18			10	
T4								20	20	5						35			20	

Tabla 35. Valores del indicador de alcance del contrato (IND3) según métrica y tramo

	IND4: Incidencias correctivas																			
I_j (%)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T0																				
T1																				
T2	2	4				2			1						2					
T3	10	18				10			5						8					
T4	20	35				20			10						15					

Tabla 36. Valores del indicador de incidencias correctivas (IND4) según métrica y tramo

	IND5: Valoración global mantenimiento																			
$I_{j\,(\%)}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T0																				
T1																				
T2		2										2	2		2			1	2	
T3		10										8	8		10			5	10	
T4		20										15	15		20			10	20	

Tabla 37. Valores del indicador de valoración global manten. (IND4) según métrica y tramo

En las tablas 38 a 42, se describen de forma detallada los cinco indicadores:

I1	Obsolescencia		
Objetivo	Valorar el nivel de obsolescencia de un equipo o conjunto de equipos. Es un indicador de su posible renovación.		
Coeficientes	**M1**	**25%**	Tiene en cuenta la antigüedad del equipo a través de M1. Se penaliza el número de incidencias y su coste tanto en el ciclo de vida total (M2; M3) como en el último cuartil (M6;M7), dando más peso a este último tramo. Se pondera el tiempo y coste de la indisponibilidad (M15;M19).
	M2	**10%**	
	M3	**10%**	
	M6	**20%**	
	M7	**20%**	
	M15	**5%**	
	M19	**10%**	
Fórmula	$I_1 = 0{,}25\ r_{1k} + 0{,}10\ r_{2k} + 0{,}10\ r_{3k} + 0{,}20\ r_{6k} + 0{,}20\ r_{7k} + 0{,}05\ r_{15k} + 0{,}10\ r_{19k}$		

Tabla 38. Descripción del indicador obsolescencia

I2	Nivel de servicio		
Objetivo	Valorar el nivel de servicio del mantenedor a través del número de intervenciones, tiempos de resolución y disponibilidad del equipo. Es un indicador relevante para el departamento usuario y para la negociación de contratos o selección de mantenedores.		
Coeficientes	**M4**	**10%**	Se tiene en cuenta al número de averías del equipos a través de las intervenciones anuales y del último cuartil (M4;M6) El mayor peso recae sobre el tiempo de solución de la incidencia y de la indisponibilidad (M14;M15). Se contempla el tiempo máximo de reparación del equipo, dando un valor pequeño (M11).
	M6	**15%**	
	M11	**5%**	
	M14	**35%**	
	M15	**35%**	
Fórmula	$I_2 = 0{,}10\ r_{4k} + 0{,}15\ r_{6k} + 0{,}05\ r_{11k} + 0{,}35\ r_{14k} + 0{,}35\ r_{15k}$		

Tabla 39. Descripción del indicador nivel de servicio

I3	Alcance contrato		
Objetivo	Se valora si el coste del contrato es adecuado. Es un indicador para la negociación de contratos, alcances, coberturas y coste.		
Coeficientes	**M8**	**20%**	Se tienen en cuenta los costes que afectan a los equipos que tienen contrato (M8;M10;M16). Se valora si el número de incidencias de los equipos a los que se les hace un preventivo (M9). Se contemplan los costes totales de mantenimiento a través de la métrica M19.
	M9	**20%**	
	M10	**5%**	
	M16	**35%**	
	M19	**20%**	
Fórmula	$I_3 = 0{,}20\ r_{8k} + 0{,}15\ r_{9k} + 0{,}05\ r_{10k} + 0{,}35\ r_{16k} + 0{,}35\ r_{19k}$		

Tabla 40. Descripción del indicador alcance de contrato

I4	Incidencias correctivas		
Objetivo	Cuantifica el volumen de averías. Es un indicador que valora la robustez del equipo, que a su vez está relacionado con la elección de compra, el uso del equipo por parte del departamento y la capacidad del mantenedor.		
Coeficientes	**M1**	**20%**	Se tiene en cuenta la antigüedad como factor multiplicativo del número de intervenciones (M1).
	M2	**35%**	
	M6	**20%**	Se contemplan el número de intervenciones a lo largo de toda la vida del equipo y en su último cuartil (M2;M6;M9).
	M9	**10%**	
	M15	**15%**	Se combina con la indisponibilidad del equipo (M15).
Fórmula	$I_4 = 0{,}20\ r_{1k} + 0{,}35\ r_{2k} + 0{,}20\ r_{6k} + 0{,}10\ r_{9k} + 0{,}25\ r_{15k}$		

Tabla 41. Descripción del indicador incidencias correctivas

I5	Valoración global mantenimiento		
Objetivo	Es una valoración global del servicio de mantenimiento. Afecta a casi todas las decisiones sobre calidad del servicio, usuario, costes, usos del equipo o robustez.		
Coeficientes	**M2**	**20%**	Se tiene en cuenta el número de intervenciones (M2) y tiempos de respuesta (M12;M13).
	M12	**10%**	
	M13	**10%**	
	M15	**20%**	Se valoran los costes de correctivos y costes totales (M18;M19).
	M18	**10%**	
	M19	**20%**	Se contempla la indisponibilidad y su coste (M15;M20).
	M20	**10%**	
Fórmula	$I_5 = 0{,}20\ r_{2k} + 0{,}10\ r_{12k} + 0{,}10\ r_{13k} + 0{,}20\ r_{15k} + 0{,}10\ r_{18k} + 0{,}20\ r_{19k} + 0{,}10\ r_{20k}$		

Tabla 42. Descripción del indicador valoración global mantenimiento

Los cinco indicadores definidos anteriormente se basan en tres niveles de parametrización según se han desarrollado en los apartados anteriores que deben ser contrastados por expertos que conozcan la operativa del mantenimiento de los equipos electromédicos.

Por tanto, es un sistema que requiere de *feedback* y que debe ajustarse a la realidad de la base de equipos instalada. Este proceso de ajuste debe entenderse como continuo, ya que a medida que se tenga más información del sistema deberá incorporarse para tener una imagen lo más fiel posible.

4.3.3 Análisis de los resultados de métricas

En este apartado se analizan los valores de las métricas según familia, tipología y departamento, subdivididas a su vez en tres agrupaciones:

A. Incidencias correctivas (M1-M7): Se analizan el número de averías y sus costes en diferentes horizontes temporales.

B. Adecuación de contrato y nivel de servicio (M8-M15): Se estudia el alcance de contrato y los tiempos de resolución de incidencias.

C. Costes de mantenimiento y valor de compra (M16-M20): Se analizan los diferentes costes de mantenimiento en relación al valor de compra de los equipos.

4.3.3.1 Análisis por familia

A. Incidencias correctivas (M1-M7)

En la tabla 43 se presentan los resultados del análisis de las métricas del número de las averías y sus costes.

FAMILIA	N	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Electromedicina	3.849	4,9	7,4	225	1,5	46	3,8	248
Diagnóstico por imagen	498	5,5	17,6	410	3,2	74	7,4	366
Total	4.347	5,0	9,0	280	1,8	56	4,4	285

Tabla 43. Métricas (M1-M7) según familia

Métrica 1: Antigüedad (M1)

De forma general, se puede considerar que los equipos electromédicos tienen una vida útil de 10 años. Esto no implica que en ese momento sea necesario sustituirlos, sino que es necesario plantearse una posible renovación tecnológica o si el mercado sigue ofreciendo un servicio de mantenimiento eficiente.

Se comprueba que la antigüedad es similar para ambas familias, con unos 5 años de media, por lo que se podría considerar que se encuentran en la mitad de su vida útil. Es ligeramente superior en los equipos de diagnóstico por imagen, posiblemente por el esfuerzo financiero que supone la adquisición de estos equipos y que su periodo de amortización es mayor.

Métrica 2: Número de intervenciones correctivas (desde el alta) (M2)

Los equipos de diagnóstico por imagen tienen un mayor número de incidencias a lo largo de su vida (17,6) frente a los de electromedicina (7,4).

Se comprueba que los equipos de diagnóstico (DIM) tienen más averías debido a dos razones una de diseño y otra por intensidad de uso. La tecnología de estas máquinas es compleja, por lo que tienen más posibilidades de fallo. Por otro lado, en los hospitales privados analizados, el elevado coste de estos equipos hace que su uso sea el máximo posible para tratar de hacer rentable la inversión.

Métrica 3: Coste medio de las intervenciones correctivas (desde el alta) (M3)

El coste medio de los correctivos de diagnóstico por imagen son 410 €/equipo, que es casi el doble que los equipos de electromedicina (225 €/equipo).

Los dispositivos de DIM tienen coste de reparación superior debido a la tecnología empleada. En el desglose de costes entre piezas y mano de obra se comprueba que el mantenedor cobra un precio más elevado de la hora de técnico de DIM, porque requiere de una mayor formación y se responsabiliza de menos equipos. También, los materiales tienen un mayor coste debido a su complejidad.

Métrica 4: Número medio anual de intervenciones correctivas (M4)

Las incidencias de anuales de diagnóstico por imagen (3,2 incidencias/eq y año) duplican a las de electromedicina (1,5 incidencias/eq y año).

Métrica 5: Coste medio anual de intervenciones correctivas (M5)

El coste medio anual de DIM es de 74 €/equipo, que es un 60% mayor al de electromedicina (46 €/equipo). Se debe tener en cuenta que estos valores utilizan como base el número total de equipos, por lo que es una medida para el conjunto y no como referencia de valoración de un correctivo individual que puede tener mayores costes.

Métrica 6: Nº de intervenciones correct. en último cuartil antigüedad (M6)

La media de correctivos en diagnóstico por imagen en el último cuartil es de 7,4, casi duplicando a los de electromedicina (3,8). Comparando estos valores con los obtenidos en la métrica 2 (nº correctivos desde el alta) se comprueba que el último cuartil se producen aproximadamente la mitad de las averías. Esto es indicativo del envejecimiento de los equipos que con el paso del tiempo empiezan a acumular mayor cantidad de incidencias.

Es un resultado a tener en cuenta para definir el tipo de alcance de contrato a medida que el equipo tiene más tiempo de uso. Se pueden plantear coberturas menores en los primeros años y aumentarlas hacia el final de su vida útil. Esto debe ser valorado desde el punto de vista del aumento de costes de contrato, ya que el mantenedor puede aumentar la prima por este mayor número de averías.

Métrica 7: Coste medio de intervenciones correctivas en último cuartil (M7)

El coste medio por correctivo en el último cuartil en los equipos diagnóstico por imagen es de 366 € por equipo, frente a los 248 € de electromedicina.

Comparando con los valores obtenidos en la métrica 3, que mide el coste desde que el equipo se adquirió, se comprueba que en el último cuartil el coste medio total se mantiene (285 €/equipo). Esto es indicativo de que, aunque aumenten el número de incidencias, la complejidad no cambia.

B. Adecuación de contrato y nivel de servicio (M8-M15)

La tabla 44 se muestran los resultados de las métricas de la M8 a la M15.

FAMILIA	N	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15
Electromedicina	3.849	50,4%	0,8	480	23,9	15,7	6,3	7,0	2,9%
Diagnóstico por imagen	498	77,1%	2,6	3.041	27,5	21,6	4,8	5,7	5,0%
Total	4.347	54,9%	1,1	907	25,0	17,5	5,9	6,6	3,2%

Tabla 44. Métricas (M8-M15) según familia

Métrica 8: Coste total intervenciones correctivas/coste total contratos (M8)

El coste de las intervenciones correctivas en relación al coste de los contratos es de 50,4% y 77,1% para los equipos de electromedicina y diagnóstico por imagen respectivamente.

Los equipos de diagnóstico por imagen tienen una menor cobertura que los de electromedicina debido a que el aumento de alcance en este tipo de equipos suele tener un coste elevado, por lo que mantener un equilibrio entre ambas resulta adecuado.

Métrica 9: Nº intervenc. correctivas anuales de equipos con preventivo (M9)

El número de correctivos de los equipos a los que se les realiza preventivos en diagnóstico por imagen es de 2,6 frente a los 0,8 de los equipos de electromedicina.

Esta medida es un subconjunto de la métrica M4, la cual incluye a cualquier equipo tenga preventivo o no. En el caso de los equipos que tienen preventivo se hace más acusada la diferencia entre las dos familias. La proporción pasa del doble en la métrica M4 al cuádruple en la M9, debido a que muchos de los equipos que no tienen preventivo tienen a su vez menos correctivos.

Métrica 10: Coste contrato anual por número de revisiones preventivas/ año

El coste unitario de contrato según los preventivos realizados es de 3.041 € para los equipos de diagnóstico por imagen, que es 6 veces mayor al de electromedicina 480 €.

Esta medida trata de relacionar el coste del contrato con el número de revisiones preventivas al año. Es una métrica que agrupa muchas otras variables, ya que no distingue entre alcances o recomendaciones del fabricante. Se ha encontrado una gran diferencia entre la familia de electromedicina y diagnóstico por imagen debido a que los equipos de DIM suelen tener preventivos de más coste, además de incluir el contrato mayores coberturas adicionales al mantenimiento preventivo.

Métrica 11: Tiempo máximo solución de una intervención correctiva (M11)

Los tiempos máximos de resolución de incidencias por equipo se mantienen cerca de la media de 25 días para ambas categorías.

Esta métrica hace referencia a un valor como cota máxima. En categorías de alto nivel o demasiado agregadas pierde parte de su significado, ya que puede no resultar representativa del grupo que contiene. En segmentaciones más pequeñas es un indicativo de la falta de capacidad del mantenedor para realizar reparaciones, ya que los tiempos para localizar las piezas se alargan.

Métrica 12: Tiempo medio de atención de una incidencia (M12)

El tiempo medio de atención de una incidencia se sitúa en las 15,7 horas para los equipos de electromedicina y 21,5 horas para los de diagnóstico por imagen.

Es una medida de la eficiencia interna del hospital en la comunicación al proveedor de la incidencia. El mayor tiempo empleado en la familia DIM se debe a la dificultad para obtener toda la información necesaria para transmitir al mantenedor lo que ha sucedido con el equipo. Una información correcta en esta fase facilita la reparación posterior.

Métrica 13: Tiempo medio de reparación por incidencia (M13)

El tiempo de reparación de un equipo de electromedicina es de 6,3 días frente a los 4,8 días en los de diagnóstico por imagen.

Esta diferencia se debe a que categoría de electromedicina incorpora una gran variedad de equipos, tecnologías y marcas, por lo que los tiempos de reparación de los equipos no resulta tan eficiente por la dispersión de averías en equipos tan diferentes.

Métrica 14: Tiempo medio de solución por incidencia (M14)

El tiempo medio de solución de una incidencia para los dispositivos de electromedicina es de 7 días frente a 5,7 días de los de diagnóstico por imagen.

El tiempo de electromedicina es superior al de DIM debido a que el tiempo de resolución es sensiblemente mayor. Una forma de acortar este tiempo es valorar la contratación de mantenedores multimarca para reducir los interlocutores.

Métrica 15: Indisponibilidad anual (M15)

Los equipos de DIM tienen una indisponibilidad anual por equipo de un 5%, frente a los 2,9 de los de electromedicina.

Esta medida combina el tiempo de resolución con las averías producidas. El valor más alto en DIM se debe a que se producen más incidencias y aunque su tiempo de resolución es menor, no es suficiente para compensarlo.

C. Costes de mantenimiento y valor de compra (M16-M20)

Se presentan los resultados de las métricas de M16 a M20 en la tabla 45.

FAMILIA	N	M16	M17	M18	M19	M20
Electromedicina	3.849	6,6%	41,4%	26,3%	67,7%	32
Diagnóstico por imagen	498	6,1%	25,1%	28,4%	53,6%	72
Total	4.347	6,5%	39,1%	26,7%	65,8%	43

Tabla 45. Métricas (M16-M20) según familia

Métrica 16: Coste anual del contrato/ valor compra equipo (M16)

Para ambas familias el valor de compra se sitúa en el entorno del 6%, algo superior para la de electromedicina 6,6%. Esta métrica es indicativa del coste del contrato. Un cálculo adicional permite conocer el número de años que tarda el coste del contrato en igualar al valor de compra.

Si el coste de mantenimiento es elevado en proporción al valor de adquisición y se puede negociar una extensión del periodo de garantía se pueden valorar renovaciones previas a la obsolescencia, teniendo en cuenta que en dicho periodo el contrato tiene coste cero.

Métrica 17: Coste total de intervenc. correctivas/valor compra equipo (M17)

Los dispositivos de electromedicina tienen un porcentaje de coste de correctivos frente al valor de compra del 41,4%, frente a los de diagnóstico por imagen que se sitúa en el 25,1%.

La familia de electromedicina tiene un valor mayor en los correctivos por la menor cobertura de costes que tienen estos por contrato.

Métrica 18: Coste total contrato/ valor compra equipo (M18)

El coste de los contratos a lo largo de toda la vida del equipo supone el 26,7%, con valores muy similares para ambas familias, por lo que éste queda equilibrado a largo plazo.

Métrica 19: Coste total de mantenimiento/ valor compra equipo (M19)

Es la suma de las métricas M17 y M18, con un valor para los equipos de electromedicina del 67,7% y del 53,6% para diagnóstico por imagen.

El gasto en mantenimiento total a lo largo de la vida útil del equipo es superior en la familia de electromedicina debido a las menores coberturas de contrato en alcance.

Métrica 20: Coste de la indisponibilidad (M20)

El coste de la indisponibilidad para los equipos de diagnóstico por imagen es de 72 €, más del doble que para los equipos de electromedicina.

4.3.3.2 Análisis por tipología

A. Incidencias correctivas (M1-M7)

Se presentan los resultados del número de las averías y sus costes en la siguiente tabla 46.

FAM	GRUPO	N	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
EM	Monitorización	1.306	4,3	3,2	160	0,7	37	1,1	183
	Cirugía	655	5,6	3,3	389	0,6	70	2,6	453
	Respiración	467	5,3	4,3	81	0,8	15	1,9	97
	Oftalmología	354	4,2	0,5	305	0,1	73	0,3	270
	Rehabilitación	289	4,6	2,2	218	0,5	47	1,5	224
	Esterilización	182	5,6	12,0	60	2,2	11	2,9	66
	Endoscopia rígida	149	5,3	8,0	566	1,5	108	2,5	630
	Odontología	129	6,6	7,7	197	1,2	30	2,4	201
	Neonatología	112	7,3	4,8	263	0,7	36	2,2	277
	Endoscopia flexible	99	4,7	3,1	603	0,7	129	1,6	592
	Diálisis	51	3,7	7,6	260	2,1	70	2,2	241
	Neurología	43	4,6	5,2	364	1,1	79	1,5	271
	Dermatología	13	4,4	1,7	239	0,4	54	0,7	239
DIM	DIM convencional	191	5,7	17,4	317	3,1	56	5,7	250
	Ultrasonidos	178	4,8	8,6	899	1,8	187	6,5	854
	Digitalización de imágenes	85	6,9	4,1	265	0,6	38	2,7	294
	DIM Alta tecnología	44	5,1	28,4	98	5,6	19	7,0	137
TOT	Total	4.347	5,0	9,0	280	1,8	56	4,4	285

Tabla 46. Métricas (M1-M7) según tipología

Métrica 1: Antigüedad (M1)

La antigüedad de los equipos se encuentra entre los 4 y los 7 años. Destacan el equipamiento de neonatología con más de 7,3 años y los equipos de digitalización de imágenes con 6,9 años. El tipo más nuevo es diálisis con 3,7 años.

Los equipos de digitalización de imágenes son los más obsoletos debido a que el hospital se encuentra en el proceso de digitalización de los equipos de rayos x, por lo que no se están realizando inversiones nuevas en esta tecnología.

Las especialidades de oftalmología y diálisis tienen los equipos con menor antigüedad debido a que son servicios que han crecido en los últimos cuatro años debido a un plan estratégico del grupo.

Métrica 2: Número de intervenciones correctivas (desde el alta) (M2)

Se aprecia claramente que los tipos el diagnóstico por imagen son los que más averías acumulan a lo largo de su vida útil, sobre todo los clasificados como de alta tecnología con 28,4 correctivos. En la parte de electromedicina la esterilización es la que más incidencias tiene con 12 intervenciones por equipo.

Los equipos de alta tecnología de DIM son los que tienen las instalaciones y diseño más complejo. No se encuentran otras razones para este alto número de incidencias como podrían ser malos usos, ya que el personal que opera estos

equipos está altamente formado. Tampoco se cuestiona el servicio o la calidad del producto, ya que los fabricantes son los más relevantes del mercado y su mantenimiento es de alto nivel. El alcance de estos contratos suele ser integral por lo que no se puede mejorar en este aspecto.

En los equipos de electromedicina la esterilización suele tener altos niveles de incidencias debido al funcionamiento con vapor a presión, elementos móviles y niveles de calidad de agua determinados, que generan muchas más averías que los equipos más basados en electrónica.

Por otro lado, contrasta el número tan bajo de averías de oftalmología, debido seguramente a que son equipos muy nuevos y muchos de ellos en periodo de garantía.

Métrica 3: Coste medio de las intervenciones correctivas (desde el alta) (M3)

El mayor coste medio de reparación por equipo se corresponde con los equipos de ultrasonidos con 899 €, seguido por los de endoscopia flexible con un coste de 603 € y rígida con 566 €.

El elevado coste de correctivos del tipo de ultrasonidos se debe al alcance de preventivo de su contrato. El tipo de incidencia más frecuente en ecografía se produce en las sondas, las cuales tienen un importe elevado de reparación, ya que están excluidas de la cobertura del contrato.

En el caso de la endoscopia el tipo de contrato tiene cobertura de preventivo debido a que en muchos casos la reparación de los equipos no es posible y es necesario sustituir el equipo. Una opción de mejora sería transferir la gestión de la sustitución del equipo al departamento de compras, ya que puede mejorar la negociación del precio.

Métrica 4: Número medio anual de intervenciones correctivas (M4)

El mayor número de reparaciones al año se realiza en los equipos de diagnóstico por imagen de alta tecnología con 5,6 correctivos anuales seguidos de los de radiología convencional con 3,1 correctivos por año. En la parte de electromedicina el mayor número de intervenciones se produce en la esterilización y diálisis en el entorno de 2 correctivos por año. Se mantienen las mismas conclusiones que las descritas en la métrica M2 para las intervenciones desde el alta.

Métrica 5: Coste medio anual de intervenciones correctivas (M5)

El mayor coste medio anual de correctivos se produce en los equipos de ultrasonidos con 187 €/año y en los de endoscopia flexible con 129 €/año.

Se mantienen las mismas conclusiones que en el análisis desde el alta.

Métrica 6: Nº intervenciones correctivas en último cuartil antigüedad (M6)

Destaca en el último cuartil de antigüedad los equipos de ultrasonidos con una media 6,5 intervenciones por equipo. En cuanto a los de la familia de electromedicina, la tipología más afectada es la esterilización con 2,9 incidencias.

En la mayoría de los equipos se comprueba que la proporción de averías producidas en el último cuartil de antigüedad es superior a 4, que sería lo esperable en una relación lineal. Las averías se concentran en el último tramo de vida del dispositivo debido a su envejecimiento.

Destaca la concentración de las intervenciones en ultrasonidos en el último tramo de su vida. El mantenedor de estos equipos se cambió en 2015 a un proveedor multimarca. Es posible que no tenga la misma capacidad de resolución de incidencias que los fabricantes debido a la heterogeneidad de marcas y modelos. Por otro lado, la esterilización mantiene la proporción de averías en un cuarto respecto del total, por lo que el nivel de incidencias permanece constante. Esto refuerza la idea de que es la propia tecnología y diseño quien define esta ratio.

Métrica 7: Coste medio de intervenciones correctivas en último cuartil (M7)

El mayor coste de las reparaciones recae en los equipos de ultrasonidos con 854 €, seguido de los de endoscopia rígida 630 €. En general este coste se mantiene constante a lo largo de la vida de los equipos por lo que el tipo de avería parece tener el mismo nivel de complejidad.

B. Adecuación de contrato y nivel de servicio (M8-M15)

La tabla 47 presenta los resultados de las métricas de la M8 a la M15.

FAM	GRUPO	N	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15
EM	Monitorización	1.306	24,4%	0,6	232	22,0	16,2	6,2	6,9	1,4%
	Cirugía	655	32,2%	0,6	889	22,5	13,1	6,7	7,3	1,2%
	Respiración	467	3,4%	1,1	871	24,9	15,8	7,3	8,0	1,8%
	Oftalmología	354	6,3%	0,2	1.078	13,2	15,3	6,7	7,3	0,2%
	Rehabilitación	289	76,3%	0,6	92	21,4	11,8	6,1	6,6	0,9%
	Esterilización	182	174,7%	3,0	873	24,4	15,9	3,3	4,0	2,4%
	Endoscopia rígida	149	257,7%	1,6	282	28,2	18,4	7,4	8,2	3,4%
	Odontología	129	na	na	na	28,9	14,9	8,1	8,8	2,8%
	Neonatología	112	7,5%	0,8	553	26,5	20,5	9,6	10,4	1,9%
	Endoscopia flexible	99	488,0%	0,8	240	27,1	17,7	5,1	5,8	1,0%
	Diálisis	51	3,7%	1,3	1.125	22,1	14,6	4,8	5,4	3,1%
	Neurología	43	43,9%	1,0	391	25,6	16,3	6,8	7,5	2,3%
	Dermatología	13	na	na	na	11,7	8,0	4,1	4,5	0,5%
DIM	DIM convencional	191	63,5%	3,3	2.548	27,8	18,0	4,3	5,1	4,2%
	Ultrasonidos	178	126,1%	1,6	490	27,3	30,0	6,3	7,6	3,7%
	Digitalización imágenes	85	9,1%	1,2	1.918	20,0	16,6	4,4	5,1	0,8%
	DIM Alta tecnología	44	0,2%	5,4	17.873	29,0	22,3	4,4	5,3	4,3%
TOT	Total	4.347	54,9%	1,1	907	25,0	17,5	5,9	6,6	3,2%

Tabla 47. Métricas (M8-M15) según tipología

Métrica 8: Coste total intervenciones correctivas/coste total contratos (M8)

Destacan por encima la endoscopia rígida (257,7%) y flexible (488%). En la familia de diagnóstico por imagen puntúan los ultrasonidos con un 126,1%.

Los equipos que más puntúan en esta medida son aquellos con una cobertura muy limitada y con coste de reparación elevado. Ultrasonidos y endoscopia necesitan una revisión de su cobertura en contrato.

Métrica 9: Nº intervenc. correctivas anuales de equipos con preventivo (M9)

Los equipos con una puntuación más alta son de alta tecnología (5,4) de la familia de diagnóstico por imagen seguidos por los de radiología convencional (3,3). En electromedicina destaca la esterilización con un valor de 3.

En el subconjunto de equipos con preventivo, se comprueba que tienen la misma estructura en el grupo completo, analizado en la M2.

Métrica 10: Coste contrato anual por número de revisiones preventivas/ año

En esta medida la mayor puntuación es obtenida por los equipos de alta tecnología 17.873 € por preventivo con gran diferencia sobre el resto Está relacionado con el coste del contrato y el tipo de alcance.

Métrica 11: Tiempo máximo solución de una intervención correctiva (M11)

La mayoría de los valores se encuentran en el intervalo de 20 a 29 días. Los valores más bajos son los de los equipos de oftalmología (13,2 días) y dermatología (11,7 días).

Esta métrica hace referencia a un valor único de cada tipo, por lo que es necesario estudiar las circunstancias en que se dio la actuación correctiva particular en cada tipo.

En el caso de oftalmología y dermatología es esperable que según pase el tiempo estos valores se igualen al resto de tipos, debido que son equipos muy nuevos y con pocas averías acumuladas en el momento de realización del estudio.

Métrica 12: Tiempo medio de atención de una incidencia (M12)

Entre los valores más altos destacan los equipos de DIM de alta tecnología (29 horas), ultrasonidos (27,3 horas) y radiología convencional (27,8 horas)

Prácticamente para todos los equipos la comunicación al proveedor se produce en menos de 24 horas, es decir, o bien se comunica en el mismo turno de trabajo o al día siguiente. En el caso de los equipos de DIM es algo superior por la necesidad de investigar la causa de la incidencia antes de su comunicación.

Métrica 13: Tiempo medio de reparación por incidencia (M13)

Se comprueba que la mayoría de las reparaciones son realizadas entre 4 y 7 días desde que el proveedor tiene conocimiento de ella. Los equipos de neonatología son los que más tiempo necesitan (9,6 días), seguidos por los de odontología (8,1). Los equipos de diagnóstico por imagen tienen un tipo de reparación en torno a 4 días, excepto los de ultrasonidos que es algo superior.

Los altos tiempos de reparación son indicativo de falta de capacidad del mantenedor debido a la obsolescencia de los equipos o falta de cualificación.

Métrica 14: Tiempo medio de solución por incidencia (M14)

La mayoría de los tipos tienen un tiempo de solución que varía entre los 5 y los 8 días. Se observa que el que mayor tiempo se da en neonatología (10,4 días).

Los resultados obtenidos son muy similares a métrica M13, ya que el aporte de la medida M12 es casi constante y con poca influencia en el total.

Métrica 15: Indisponibilidad anual (M15)

El mayor porcentaje de indisponibilidad de los equipos se da en la familia de diagnóstico por imagen con 4,3% para la alta tecnología y un 4,2% para la convencional, seguido de un 3,7% en los equipos de ultrasonidos. De los tipos de electromedicina el mayor es de la endoscopia rígida con un 3,4%.

C. Costes de mantenimiento y valor de compra (M16-M20)

En la tabla 48 se indican los resultados de las métricas de M16 a M20.

FAM	GRUPO	N	M16	M17	M18	M19	M20
EM	Monitorización	1.306	8,2%	35,5%	26,6%	62,1%	56
	Cirugía	655	3,6%	21,9%	18,2%	40,1%	120
	Respiración	467	8,1%	15,5%	42,0%	57,5%	59
	Oftalmología	354	3,6%	56,1%	13,4%	69,5%	130
	Rehabilitación	289	5,7%	51,9%	16,9%	68,9%	76
	Esterilización	182	9,2%	61,4%	53,1%	114,5%	110
	Endoscopia rígida	149	1,4%	165,9%	6,3%	172,1%	183
	Odontología	129	na	62,8%	na	62,8%	50
	Neonatología	112	5,7%	60,4%	33,4%	93,8%	53
	Endoscopia flexible	99	3,5%	34,6%	21,5%	56,1%	436
	Diálisis	51	5,4%	12,4%	29,6%	42,1%	76
	Neurología	43	3,2%	31,2%	10,7%	41,9%	98
	Dermatología	13	na	16,4%	na	16,4%	119
DIM	DIM convencional	191	8,5%	24,6%	38,1%	62,7%	139
	Ultrasonidos	178	2,0%	28,4%	7,5%	35,9%	213
	Digitalización de imágenes	85	9,7%	23,2%	64,3%	87,5%	213
	DIM Alta tecnología	44	9,0%	1,6%	35,5%	37,1%	50
TOT	Total	4.347	6,5%	39,1%	26,7%	65,8%	43

Tabla 48. Métricas (M1-M7) según tipología

Métrica 16: Coste anual del contrato/ valor compra equipo (M16)

Los equipos de diagnóstico por imagen tienen valor de métrica (M16) en el entorno del 9%, particularmente un 8,5% para los equipos convencionales, un 9,7% para la digitalización de imágenes y 9% para la alta tecnología. Se encuentran porcentajes similares en algunos tipos de la familia de electromedicina como la monitorización 8,2%, respiración 8,1% y esterilización 9,2%.

Los tipos con valores más elevados tienen una cobertura superior en contrato debido a la complejidad de la tecnología o a la criticidad de fallo, como ocurre en los equipos que emiten radiación ionizante o los de soporte vital.

Métrica 17: Coste total de intervenc. correctivas/valor compra equipo (M17)

El mayor porcentaje encontrado de la métrica M17 ha sido en la endoscopia rígida 165,9%. En un segundo nivel rondando el 60%, se encuentran los equipos de esterilización (61,4%), odontología (62,8%) y neonatología (60,4%). El tipo más bajo es el de alta tecnología con un 1,6%.

Esta métrica complementa el análisis de la M16, ya que las incidencias que no están cubiertas por contrato genera un coste un coste correctivo. Se ha comprobado, que los alcances de determinados tipos pueden ser muy limitados (endoscopia u odontología).

Métrica 18: Coste total contrato/ valor compra equipo (M18)

En DIM los mayores valores obtenidos son la digitalización de imágenes con un 64,3%, seguido de la radiología convencional con un 38,1%. En el equipamiento de electromedicina el mayor valor se corresponde con la esterilización (53,1%) y los equipos de respiración (42%). Los equipos de radiología convencional y de digitalización se encuentran al final de su vida útil por lo que el coste total del contrato es elevado por el número de años que han acumulado.

Métrica 19: Coste total de mantenimiento/ valor compra equipo (M19)

Los valores más altos se corresponden con la endoscopia rígida (172,1%), la esterilización (114,5%) y la neonatología (93,8%) para electromedicina y con la digitalización (87,5%) para los equipos de diagnóstico por imagen.

En estos tipos la ratio se acerca a 1, por lo que se deben valorar planes de renovación o renegociación de contratos y alcances.

Métrica 20: Coste de la indisponibilidad (M20)

El mayor coste de indisponibilidad se da en la endoscopia, tanto flexible (436 €) como rígida (183 €), seguido por los equipos de ultrasonidos (213 €) y de digitalización de imágenes (213 €).

4.3.3.3 Análisis por departamento

Se consideran 15 departamentos para el análisis. En esta agrupación se combinan diferentes equipos según el proceso que realice, independientemente de su función o tipología.

A. Incidencias correctivas (M1-M7)

En la tabla 49 se presentan los resultados del número de averías y sus costes clasificado por departamentos.

DEPARTAMENTO	N	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Quirófano	1.220	5,5	5,9	260	1,1	47	1,1	287
Consultas	993	4,2	3,1	355	0,7	84	1,9	298
UCI adultos	399	4,0	3,9	170	1,0	42	1,6	190
Diagnóstico por imagen	299	5,9	15,7	350	2,7	60	4,5	323
Rehabilitación	271	4,7	2,5	207	0,5	45	1,0	220
UCI pediátrica	266	7,1	4,0	207	0,6	29	0,8	226
Hospitalización	260	3,4	2,8	112	0,8	32	0,9	169
Urgencias	228	4,6	3,2	183	0,7	40	1,2	191
Endoscopias	120	5,8	5,3	450	0,9	77	0,8	407
Maternidad	88	6,2	4,4	220	0,7	36	2,0	257
Oncología	61	6,3	2,6	174	0,4	28	0,6	135
Hemodinámica	48	7,0	7,2	215	1,0	31	1,3	165
Laboratorio	37	5,5	2,5	175	0,5	32	1,1	67
Diálisis	36	3,5	6,5	248	1,9	72	1,5	257
Reproducción	21	5,3	2,6	1.166	0,5	219	1,1	304
Total	4.347	5,0	9,0	280	1,8	56	4,4	285

Tabla 49. Métricas (M1-M7) según departamento

Métrica 1: Antigüedad (M1)

La antigüedad media de los equipos analizados se encuentra entre los 3,4 y los 7,1 años. Se observó que los departamentos con equipamiento con mayor antigüedad es la UCI pediátrica y hemodinámica con 7,1. La hospitalización es la que tiene equipos de menor antigüedad (3,4 años), junto con diálisis con 3,5 años.

Esto puede ser debido a que las UCIs pediátricas fueron reformadas integralmente hace 8 años en varios hospitales y parte de su equipamiento también fue renovado en la misma fecha. Además, dos UCIs fueron cerradas y se distribuyó su material entre los restantes de otros hospitales por lo que no ha sido necesario adquirir nuevos equipos. Por otro lado, diálisis tiene equipos más nuevos debido a su reciente creación.

Métrica 2: Número de intervenciones correctivas (desde el alta) (M2)

El departamento de diagnóstico por imagen es el que más intervenciones correctivas acumula (15,7), seguido de hemodinámica (7,2). Los departamentos con menos averías son hospitalización (2,8), rehabilitación (2,5), laboratorio (2,5) o reproducción (2,8).

Como se ha comentado en anteriores análisis, los equipos del departamento de DIM son los que tienen las instalaciones y diseño más complejo, lo cual justifica que sea el que mayor número de averías acumule.

En el departamento de hospitalización se comprueba que el menor número de averías puede estar relacionado con la poca antigüedad y que muchos de ellos pueden estar en periodo de garantía. También son dispositivos más sencillos y robustos los que se usan en este servicio.

Por otro lado, los equipos de laboratorio son los que menos averías reportan debido al personal especializado que los usa y que tampoco están en contacto con el paciente. Esto hace que sean equipos que sufren una menor manipulación y traslados.

Métrica 3: Coste medio de las intervenciones correctivas (desde el alta) (M3)

El mayor coste medio de reparación se produce en el departamento de reproducción (1.166 €), seguido del de endoscopias (450 €). El menor importe se encuentra la hospitalización (112 €).

Tanto en endoscopias como en reproducción asistida el alcance del contrato tiene cobertura de preventivo o directamente no hay contrato debido a que en muchos casos la reparación de los equipos no es posible y es necesario sustituir el equipo, por lo que es preferible repararlo por vía correctiva bajo presupuesto. Es posible que elevando el alcance del contrato se optimicen los costes.

El bajo coste de las incidencias de hospitalización se encuentra en línea con lo analizado en las métricas M1 y M2, ya que son equipos modernos, algunos en periodo de garantía y con tecnología básica.

Métrica 4: Número medio anual de intervenciones correctivas (M4)

El departamento que más reparaciones al año realiza es el de diagnóstico por imagen con 2,7 correctivos por año seguidos de diálisis con 1,9 correctivos tecnología e intensidad de uso.

Contrasta el alto número de incidencias anuales del departamento de diálisis con la poca antigüedad del equipamiento, atribuidas al propio diseño del equipo, que por tener un flujo de agua en continuo y partes móviles genera más averías que otros equipos con mayor base electrónica.

Métrica 5: Coste medio anual de intervenciones correctivas (M5)

El mayor coste medio anual de reparación se da en el departamento de reproducción asistida (219 €/año), seguido de endoscopias (77 €/año). El menor importe se encuentra la UCI pediátrica (29 €/año). Reproducción y endoscopias tienen un comportamiento similar al analizado en la métrica que M3, ya que comparten una antigüedad parecida.

La UCI pediátrica es la que menos coste medio anual tiene debido a unos importes bajos de reparación y una antigüedad elevada, lo cual hace que esta ratio baje.

Métrica 6: Nº de intervenciones correct. en último cuartil antigüedad (M6)

El departamento con más correctivos en el último cuartil de antigüedad es el de diagnóstico por imagen y hospitalización con 4,5 y 1,9 intervenciones por equipo respectivamente.

Esta métrica debe analizarse en combinación con la M2, que indica el número de incidencias totales que han tenido los equipos asociados a los procesos de cada departamento. Si el índice de averías no cambia por año, lo esperable sería que el número de incidencias en el último cuartil fuera una cuarta parte de todas las que se han producido a lo largo de la vida del equipo. Si las averías se concentran en el último tramo de vida del dispositivo habría que valorar si se está produciendo una obsolescencia del mismo.

En la mayoría de los departamentos se comprueba que la proporción de incidencias producidas en el último cuartil de antigüedad respecto del total es aproximadamente un cuarto, según lo esperado.

Sin embargo, no se cumple esta relación en el departamento de consultas, como caso principal, ni en maternidad, UCI de adultos, rehabilitación, como casos destacados, en los que se está produciendo entre el 40% y 60% de las incidencias totales. Se comprobó que en consultas y rehabilitación los equipos tienen una vida media menor que en otros departamentos, debido posiblemente al uso intensivo que se hace ellos (o envejecimiento prematuro) o peor calidad en la compra (relacionado con la robustez). En la UCI de adultos hay un uso intensivo de los equipos con funcionamiento de 24 horas.

Métrica 7: Coste medio de intervenciones correctivas en último cuartil (M7)

El mayor coste de las reparaciones se da en los departamentos de endoscopias (407 €), seguido del de diagnóstico por imagen (323 €). En general este coste se mantiene constante a lo largo de la vida de los equipos (M3) por lo que el tipo de avería parece tener el mismo nivel de complejidad. Solo se reduce en laboratorio y reproducción.

B. Adecuación de contrato y nivel de servicio (M8-M15)

Se presentan los valores por departamento de las métricas de M8 a M15 en la tabla 50.

DEPARTAMENTO	N	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15
Quirófano	1.220	74,1%	1,1	806	24,9	15,5	5,7	6,3	1,9%
Consultas	993	81,0%	0,9	357	24,8	17,6	7,3	8,0	1,6%
UCI adultos	399	24,6%	1,0	534	24,5	16,2	6,6	7,3	1,9%
Diagnóstico por imagen	299	75,7%	3,2	4.083	27,5	20,7	4,6	5,4	4,0%
Rehabilitación	271	73,8%	0,6	100	22,2	12,2	6,1	6,7	1,0%
UCI pediátrica	266	8,8%	0,7	488	23,4	19,3	8,0	8,8	1,4%
Hospitalización	260	25,0%	0,7	239	20,8	14,5	5,4	6,0	1,3%
Urgencias	228	37,0%	0,8	285	22,2	14,7	6,5	7,1	1,4%
Endoscopias	120	22,3%	0,7	291	27,2	23,2	5,8	6,8	1,7%
Maternidad	88	23,1%	0,6	331	22,8	15,8	5,5	6,1	1,2%
Oncología	61	6,4%	0,4	316	17,0	20,9	5,7	6,6	0,7%
Hemodinámica	48	19,4%	1,7	4.291	22,5	23,5	4,2	5,2	1,5%
Laboratorio	37	4,1%	0,1	261	11,2	9,3	4,8	5,2	0,7%
Diálisis	36	26,6%	0,6	230	24,1	17,2	6,0	6,8	3,5%
Reproducción	21	36,8%	0,5	348	26,5	42,9	6,1	7,9	1,1%
Total	4.347	54,9%	1,1	907	25,0	17,5	5,9	6,6	3,2%

Tabla 50. Métricas (M8-M15) según departamento

Métrica 8: Coste total intervenciones correctivas/coste total contratos (M8)

Los departamentos con una ratio más alto de coste de correctivos frente a contratos son consultas (81%), rehabilitación (73,8%), quirófano (74,1%) y diagnóstico por imagen (75,7%).

Está métrica obtiene alta puntuación en la medida en que la cobertura por contrato es limitada y el coste de los correctivos es elevado, tanto por volumen como por precio unitario. En el caso de consultas y rehabilitación, el coste total de las intervenciones correctivas es elevado comparativamente con el de contratos, debido al gran número de intervenciones debidas el uso intensivo de los equipos. Esta ratio puede ser indicativa de obsolescencia, mal uso por parte de personal sanitario y falta de calidad en la selección del equipamiento por el área de compras.

Para quirófanos y diagnóstico por imagen la cobertura del contrato es elevada y por lo tanto también los son sus costes. En este caso, el coste unitario del correctivo es alto, así como el número de incidencias debido al uso intensivo de los equipos. Se observa en estos departamentos la existencia de malos usos excluidos del alcance del contrato o falta de robustez de los dispositivos o envejecimiento prematuro del equipamiento.

Métrica 9: Nº intervenc. correctivas anuales de equipos con preventivo (M9)

El departamento con la puntuación más alta es de diagnóstico por imagen (3,2), seguido por el de hemodinámica (1,7). Esta métrica analiza el número anual de incidencias (M4) en el subconjunto de equipos con preventivo con el fin de valorar si la existencia de preventivos afecta al número de averías. Se comprueba que el departamento de diagnóstico por imagen es en ambos casos el que puntúa más alto.

La métrica M9 se puede usar como comparador de equipos de similares características y diferentes frecuencias de intervenciones preventivas, de forma que se esperaría un menor coste correctivo para aquellos dispositivos con más revisiones preventivas.

Métrica 10: Coste contrato anual por número de revisiones preventivas año

La mayor puntuación obtenida en coste de contrato anual por número de revisiones preventivas por año se da en los departamentos de diagnóstico por imagen con 4.083 € por preventivo y hemodinámica con 4.291 €.

Esta ratio está relacionada con el coste del contrato, alcance y número de revisiones preventivas establecidas por el fabricante. Los departamentos de diagnóstico por imagen y hemodinámica (como sala de intervencionismo) tienen un alto valor por el alto coste del contrato y elevado alcance (en muchos casos integral). La cantidad se ve incluso disminuida por el hecho de que estos equipos suelen tener varias revisiones preventivas al año.

Métrica 11: Tiempo máximo solución de una intervención correctiva (M11)

Casi todos valores se encuentran en el intervalo de 20 a 29 días. El departamento con menor tiempo máximo de resolución es laboratorio con una media de 11,2 días.

Esta medida se refiere a un caso particular, por lo que requeriría analizar las circunstancias concretas en la que se dio la incidencia.

Métrica 12: Tiempo medio de atención de una incidencia (M12)

Todas las incidencias son comunicadas al proveedor en menos de 24 horas a excepción de la unidad de reproducción que tiene una media de 42,9 horas. El departamento que requiere menos tiempo es laboratorio con 9,2 horas.

Casi todas las incidencias son comunicadas en mismo turno de trabajo o en el siguiente del tramitador de averías. El departamento de reproducción asistida tiene un valor más elevado dada la heterogeneidad de equipos existentes y debido a que el área fue internalizada en el año 2019 y resulta más complicado el proceso de selección de mantenedor.

Métrica 13: Tiempo medio de reparación por incidencia (M13)

El departamento que tiene mayor tiempo de reparación de equipos por incidencia es la UCI pediátrica con 8 días. En resto se sitúa entre 4 y 7 días, sin grandes diferencias entre ellos. El diagnóstico por imagen tiene los valores más bajos con 4,6 días.

El alto valor de esta métrica en la UCI pediátrica está relacionado con el nivel de obsolescencia de los equipos, ya que este departamento también puntuó alto en la métrica de antigüedad. Es posible que empiece a haber problemas de suministro de piezas en los equipos más mayor antigüedad.

Métrica 14: Tiempo medio de solución por incidencia (M14)

El departamento que tiene mayor tiempo medio de resolución por incidencia se da en la UCI pediátrica con 8,8 días. El más bajo es laboratorio con 5,2 días. El resto de departamentos se sitúa entre 5 y 7 días de tiempo de solución.

Los resultados obtenidos siguen el patrón de la métrica M13, ya que el aporte de la medida M12 es inferior a las 24 h y tiene poca influencia en el total.

Métrica 15: Indisponibilidad anual (M15)

El mayor porcentaje de indisponibilidad de los equipos se da en departamento de diagnóstico por imagen (4,0%). Este valor puede ser indicativo de que se producen muchas averías, que tienen tiempo reparación prolongado o ambas. En este caso, según la M2 sería por número de incidencias.

C. Costes de mantenimiento y valor de compra (M16-M20)

En la tabla 51 se presentan los resultados de M16 a la M20.

DEPARTAMENTO	N	M16	M17	M18	M19	M20
Quirófano	1.220	4,9%	35,9%	22,4%	58,3%	126
Consultas	993	6,8%	43,2%	26,9%	70,2%	117
UCI adultos	399	6,6%	19,8%	31,9%	51,8%	50
Diagnóstico por imagen	299	6,5%	24,8%	33,9%	58,8%	143
Rehabilitación	271	6,0%	52,9%	18,2%	71,1%	62
UCI pediátrica	266	6,7%	42,3%	38,8%	81,0%	64
Hospitalización	260	11,0%	45,6%	23,3%	68,9%	47
Urgencias	228	10,1%	60,0%	28,5%	88,4%	46
Endoscopias	120	3,9%	80,1%	19,1%	99,2%	156
Maternidad	88	6,2%	40,4%	31,7%	72,0%	96
Oncología	61	6,2%	39,2%	34,2%	73,4%	122
Hemodinámica	48	5,7%	23,6%	28,7%	52,3%	101
Laboratorio	37	6,6%	25,0%	35,4%	56,4%	128
Diálisis	36	5,1%	19,9%	13,3%	33,2%	58
Reproducción	21	4,7%	51,1%	18,1%	69,1%	124
Total	4.347	6,5%	39,1%	26,7%	65,8%	43

Tabla 51. Métricas (M16-M20) según departamento

Métrica 16: Coste anual del contrato/ valor compra equipo (M16)

El departamento de hospitalización es el que tiene un mayor coste anual del contrato respecto del valor compra equipo con un 11%, seguido de urgencias con el 10,1%. En resto de departamentos se sitúan en el rango de 4,4%-6,8%.

Esta ratio compara el coste del contrato con el valor del equipo. En el caso de los equipos de los departamentos de hospitalización y urgencias se observa un valor superior al resto porque el valor de compra ha ido disminuyendo en los últimos años y no se ha visto trasladada a los costes de mantenimiento que se han mantenido de relativamente constantes.

Métrica 17: Coste total de intervenc. correctivas/valor compra equipo (M17)

La mayor ratio de coste total de intervenciones correctivas respecto del valor compra equipo se da en endoscopias con un 80,1%, seguido por la urgencia con el 60%. El valor más bajo se da en la UCI de adultos con el 19,8%.

Es una métrica complementaria a la M16, ya que las incidencias no cubiertas por contrato generan un coste un coste correctivo. El departamento de endoscopias tiene un alto valor debido a que la mayoría de los costes se producen por vía correctiva. En el caso de la urgencia el coste de los correctivos es alto, ya que el valor de compra es bajo en relación a los costes de reparación. La UCI tiene un porcentaje bajo porque los equipos tienen una cobertura elevada.

Métrica 18: Coste total contrato/ valor compra equipo (M18)

El mayor coste del contrato a lo largo de la vida del equipo comparado con el valor de compra se da en la UCI pediátrica con el 38,8%.

En esta métrica influye la antigüedad del equipo, por lo tanto, el departamento de UCI pediátrica tiene una puntuación alta, a pesar de no tener un valor de contrato anual elevado.

Métrica 19: Coste total de mantenimiento/ valor compra equipo (M19)

El valor más alto se corresponde con el departamento de endoscopia (99,2%), seguido del de urgencias con el 88,4%.

Para el departamento de endoscopias se propone renegociar los costes de las intervenciones correctivas y/o cambiar alcance de contrato a uno de mayor cobertura. Para urgencias se debería mejorar la calidad de los equipos suministrados.

Métrica 20: Coste de la indisponibilidad (M20)

El mayor coste de indisponibilidad se da en el departamento de endoscopias (156 €), seguido por el de diagnóstico por imagen (143 €).

4.3.4 Análisis de los resultados por indicador

La puntuación del indicador no tiene unidades (es un valor en porcentaje). El valor cero es la mejor puntuación. A medida que crece el porcentaje el indicador empeora hasta un máximo del 100%.

El indicador es una herramienta de comparación entre familias, tipos o departamentos. El valor obtenido no tiene interpretación directa sobre las características particulares de los equipos, ya que representa una combinación de ellas con distintos pesos según la parametrización realizada.

4.3.4.1 Análisis de indicadores por familia

Se presenta en la tabla 52 los resultados de los indicadores aplicados a la familia de electromedicina y diagnóstico por imagen.

	Obsoles-cencia	**Nivel de Servicio**	**Contrato**	**Incidencias Correctivas**	**Valoración Global Mantenimiento**
Electromedicina	12,18%	11,43%	10,04%	13,23%	12,24%
Diagnóstico por imagen	23,62%	21,82%	21,42%	29,03%	22,89%

Tabla 52. Indicadores según familia

En la figura 61 y 62 se comparan los cinco indicadores de electromedicina y diagnóstico por imagen.

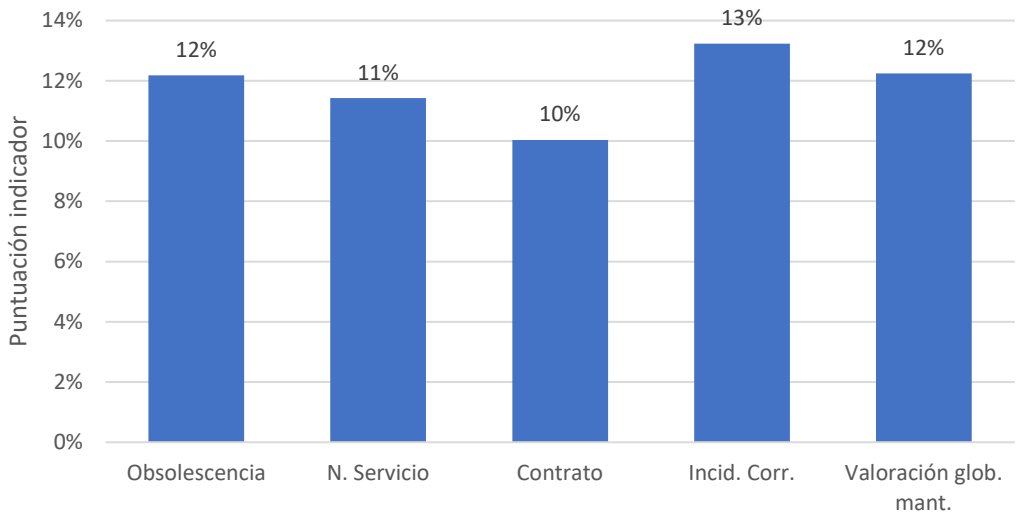


Figura 61. Comparación de indicadores de la familia de electromedicina

Los valores de la familia de electromedicina se sitúan en un rango muy estrecho entre el 10% y el 13%. El indicador de contrato es el que tiene la puntuación más baja con un 10%. El que más alto puntúa es el número de incidencias correctivas con un 13%.

No existen grandes diferencias entre los distintos indicadores debido a que la clasificación de electromedicina es muy heterogénea, por lo que no resulta concluyente para la comparación entre indicadores.

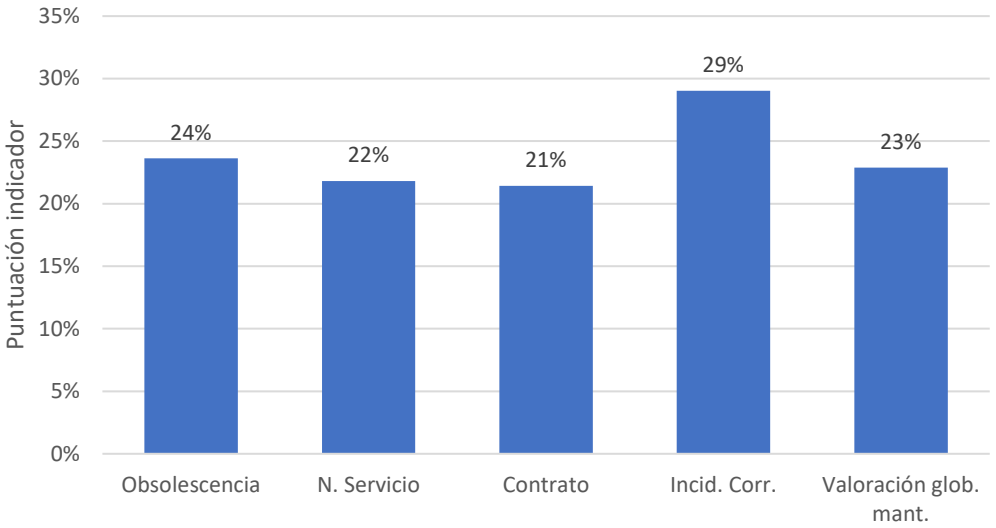


Figura 62. Comparación de indicadores de la familia de diagnóstico por imagen

Se comprueba que los indicadores de diagnóstico por imagen tienen valores más altos que los de electromedicina por encima del 20%. En este caso, existe una mayor dispersión de los valores que van del 21% del contrato hasta el 29% de incidencias correctivas. Las proporciones entre indicadores se mantienen en ambas familias.

4.3.4.2 Análisis de indicadores por tipología

La tabla 53 contiene los resultados de los indicadores por tipología.

		Obsoles-cencia	**Nivel Servicio**	**Con-trato**	**Incid. Correc**	**Valoración Global Mantenim.**
EM	Monitorización	10,60%	10,88%	13,08%	11,80%	12,91%
	Respiración	13,20%	14,62%	10,89%	16,61%	14,70%
	Neonatología	19,60%	19,14%	11,38%	19,95%	19,55%
	Oftalmología	6,16%	3,18%	1,59%	4,42%	3,18%
	Cirugía	14,54%	12,19%	8,37%	14,21%	11,91%
	Endoscopia flexible	9,59%	5,89%	7,80%	7,36%	8,92%
	Endoscopia rígida	16,79%	14,33%	8,62%	15,20%	12,58%
	Esterilización	18,41%	16,02%	17,77%	25,18%	19,29%
	Odontología	16,92%	16,37%	2,78%	20,02%	13,34%
	Rehabilitación	9,38%	7,19%	9,70%	9,20%	9,20%
	Neurología	13,09%	18,59%	13,57%	17,88%	15,95%
	Diálisis	12,75%	19,85%	2,03%	19,37%	17,24%
	Dermatología	5,69%	4,50%	0,92%	5,50%	4,31%
DIM	Digitalización imágenes	18,47%	9,26%	12,89%	18,35%	14,07%
	Ultrasonidos	25,27%	22,13%	19,35%	25,20%	20,99%
	DIM Convencional	24,04%	24,20%	25,90%	33,68%	26,76%
	DIM Alta tecnología	25,10%	34,50%	26,85%	45,01%	30,77%

Tabla 53. Indicadores según tipología

IND1: Indicador de obsolescencia

La figura 63 presenta el resultado del indicador de obsolescencia por tipología de equipos.

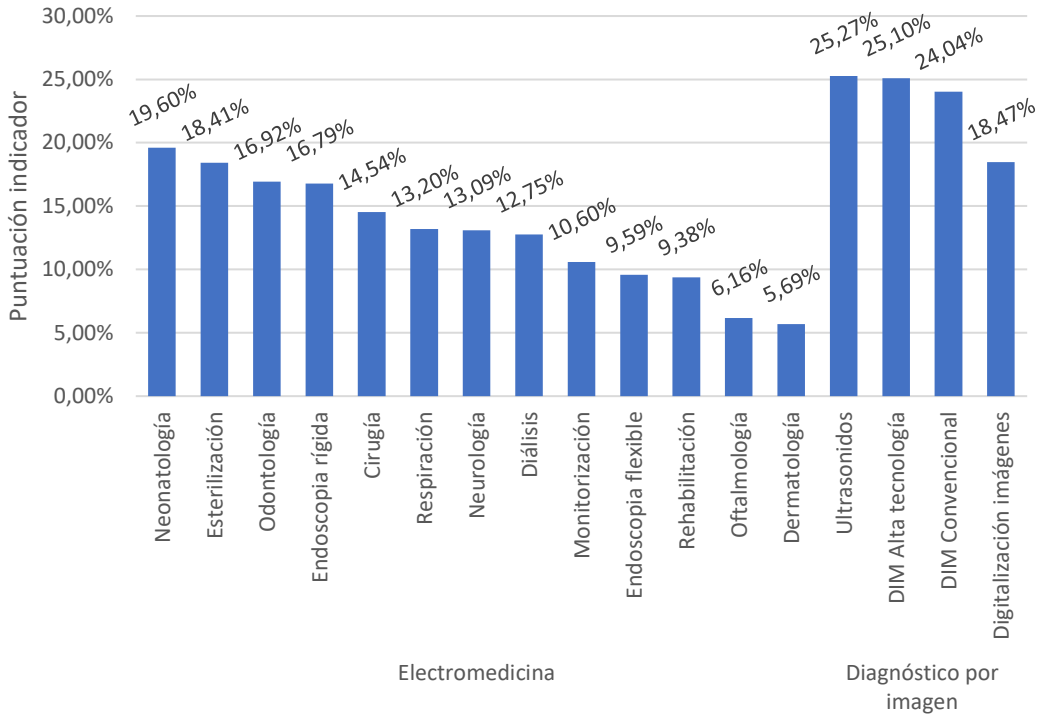


Figura 63. Indicador de obsolescencia según tipología

Los valores más altos del indicador de obsolescencia se encuentran en los equipos de ultrasonidos (25%), diagnóstico por imagen de equipos convencionales (24%) y alta tecnología (25%). En cuanto al equipamiento de electromedicina la neonatología tiene un valor del 20%, seguido de la esterilización con el 18%. Los indicadores más bajos se dan en rehabilitación (9%), oftalmología (6%) y dermatología (6%).

En la figura 63 se aprecia claramente una diferencia importante entre los tipos de electromedicina y diagnóstico por imagen. El indicador de obsolescencia penaliza la antigüedad del equipo, el número de incidencias y su coste, teniendo en cuenta si esto se ha producido en el último cuartil. Para el caso del diagnóstico por imagen se producen varias de estas circunstancias simultáneamente, sobre todo el coste y el número de averías. Para los equipos de electromedicina hay mucha más variabilidad entre tipos. El equipamiento de neonatología puntúa alto debido a la variable antigüedad y número de incidencias, si bien el coste unitario de cada reparación no es muy elevado.

IND2: Indicador de nivel de servicio

La figura 64 muestra los valores del indicador de nivel de servicio por tipología de equipos.

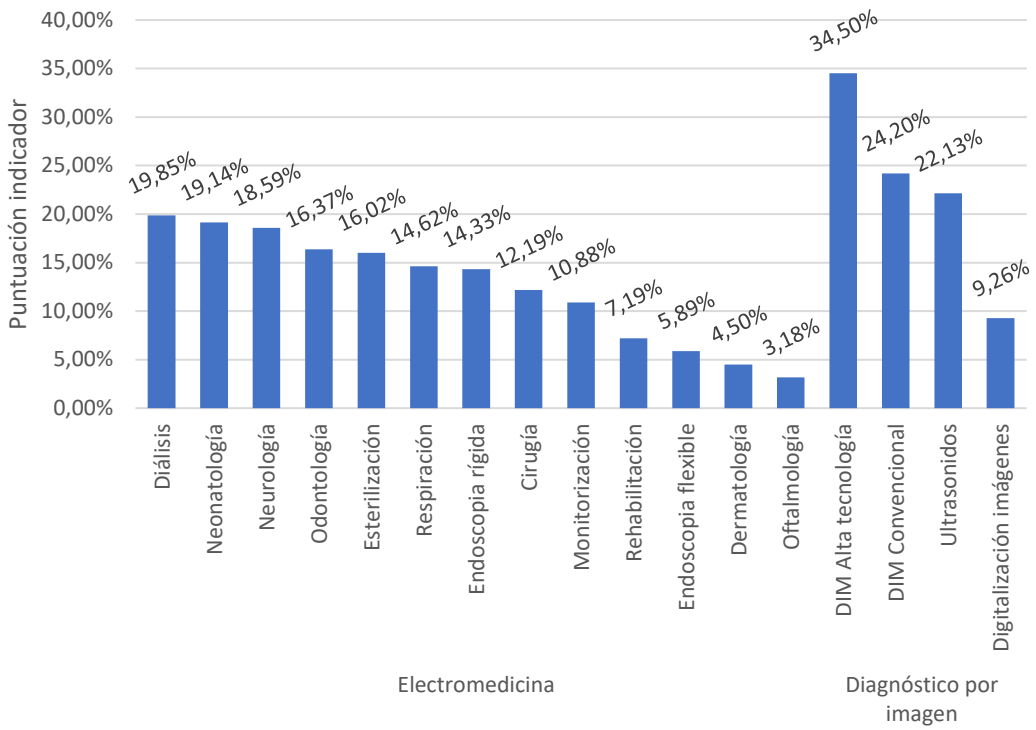


Figura 64. Indicador de nivel de servicio según tipología

Los equipos de diagnóstico por imagen obtienen las mayores puntuaciones por bajo nivel de servicio, destacando los equipos de alta tecnología con un 35% y seguidos por la radiología convencional 24% y los ultrasonidos con el 22%. Los valores más altos en electromedicina se corresponden con diálisis (20%), neurología (19%) y neonatología (19%). El equipamiento con mejor nivel de servicio son oftalmología (3%), rehabilitación (7%) y dermatología (5%).

La mayor penalización de este indicador se da por los tiempos de resolución e indisponibilidad anual de los equipos, que combina, además el número de averías producidas. Los equipos de diagnóstico por imagen tienen una alta indisponibilidad que combinada con el tiempo de resolución hace que el indicador alcance valores elevados.

El equipamiento de diálisis es el más penaliza el indicador de nivel de servicio dentro de la familia de electromedicina. Esto se debe a su alto nivel de indisponibilidad.

IND3: Indicador de alcance de contrato

El gráfico 65 contiene los resultados del indicador de alcance de contrato.

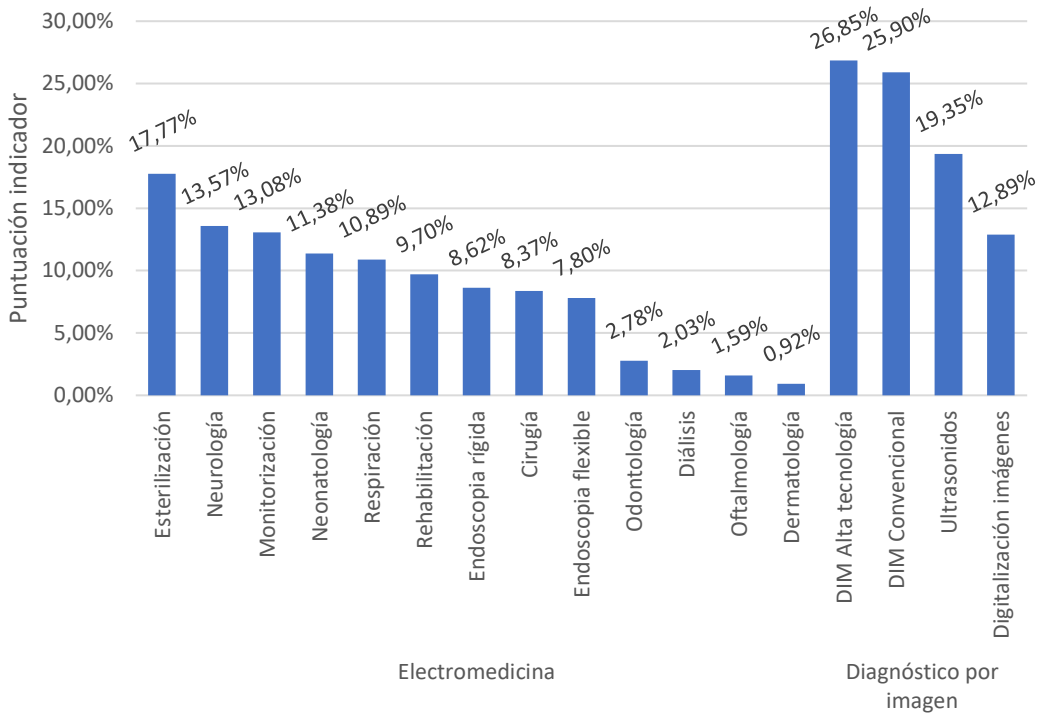


Figura 65. Indicador de alcance de contrato según tipología

Los equipos de diagnóstico por imagen son los que más puntuación obtienen en el indicador de adecuación del alcance del contrato: alta tecnología 27%, convencional 26% y ultrasonidos 19%. Los equipos de esterilización (18%) son los siguientes en puntuación dentro de la familia de electromedicina.

En este indicador se tiene en cuenta el coste del contrato y la proporción que guarda con el coste de las averías correctivas y el valor de compra del equipo. Los equipos de diagnóstico por imagen se ven penalizados por el alto coste de los contratos y por el número y coste de los correctivos. En los equipos de electromedicina el tipo más puntuado es la esterilización debido al alto número de correctivos y sus costes de reparación. También la proporción de valor de contrato, respecto de su valor de compra es elevado.

Muchos de estos equipos tienen un alcance de mano de obra, por lo que sería necesario revisar si compensa aumentar la cobertura a integral o si conviene reducirla dejándola en preventivo y facturando el resto de averías bajo presupuestos independientes.

IND4: Indicador de nivel de incidencias correctivas

La figura 66 muestra el resultado del indicador de nivel de incidencias correctivas por tipología.

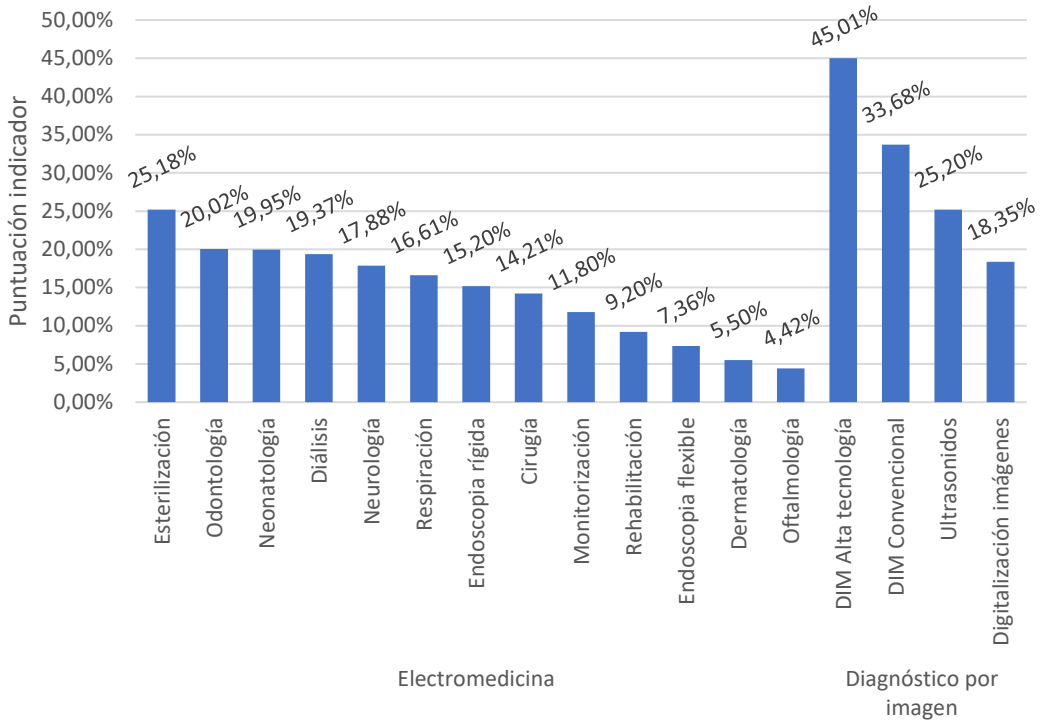


Figura 66. Indicador del nivel de incidencias correctivas según tipología

Desatacan en este indicador los equipos de diagnóstico por imagen de alta tecnología (45%) y radiología convencional (34%). En cuanto a los equipos de electromedicina, la esterilización (25%) es la que más puntuación obtiene, seguida por los de odontología (20%) y esterilización (20%).

En este indicador se tiene en cuenta, fundamentalmente, el número de incidencias y si estas han aumentado en el último periodo de vida del equipo (definido por el cuarto cuartil). La antigüedad del equipo también forma parte del cálculo.

Los equipos de diagnóstico por imagen de alta tecnología y convencionales obtienen una puntuación elevada comparada con el resto, debido al alto número de incidencias que tienen estos dispositivos. Esto se justifica por el uso intensivo que se hace de ellos, así como por la complejidad de diseño que hace más probable el fallo de alguno de sus elementos.

Dentro de la familia de electromedicina el tipo con el valor más elevado es el de esterilización. Son equipos de uso intensivo con partes móviles y fluidos a alta temperatura que dan lugar a múltiples averías.

IND5: Indicador valoración global del mantenimiento

La figura 67 muestra el indicador de valoración global de mantenimiento por tipología de equipos.

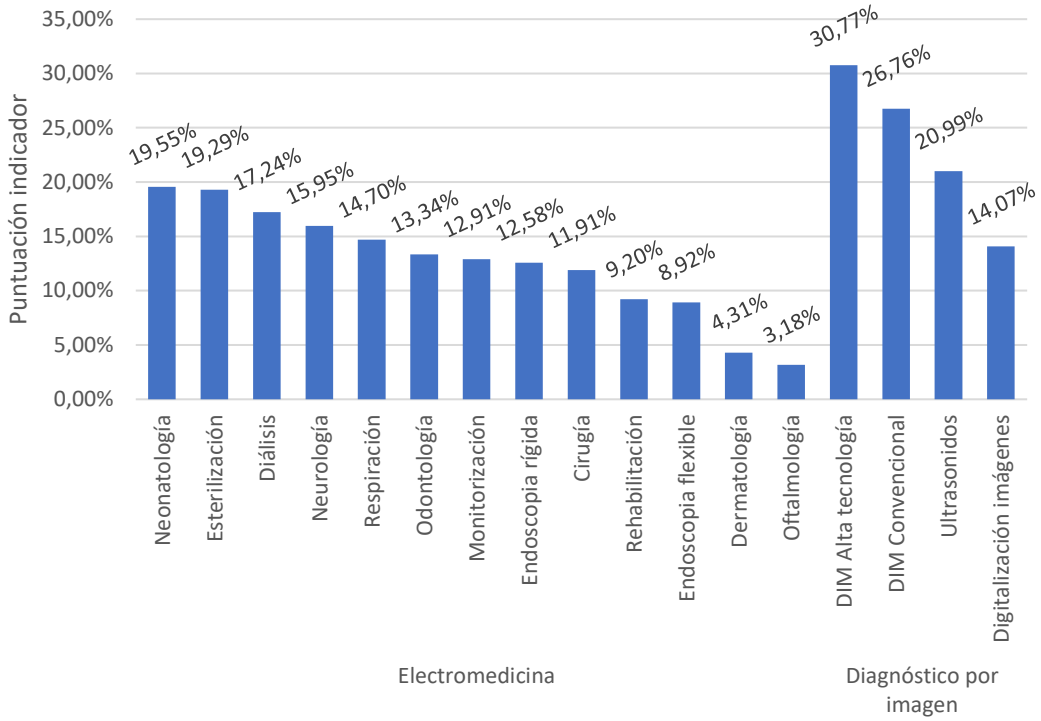


Figura 67. Indicador de valoración global del mantenimiento según tipología

Los equipos de diagnóstico por imagen son los obtienen una puntuación más elevada en la valoración global del mantenimiento: alta tecnología 31%, convencional 27% y ultrasonidos 21%, seguidos de los equipos neonatología (20%) y de esterilización (19%).

En este indicador se contemplan las diferentes dimensiones de evaluación del mantenimiento: número de incidencias, costes, tiempos de reparación e indisponibilidad de los equipos.

La tipología más penalizada en la familia de diagnóstico por imagen es la alta tecnología y convencional. Son dispositivos con gran número de incidencias y costes de elevados de mantenimiento debido a la complejidad que poseen. También presentan altos tiempos de indisponibilidad.

En la familia de electromedicina el tipo de neonatología tiene el valor más elevado. Estos equipos tienen un elevado nivel de obsolescencia que puede provocar un mayor número de incidencias y de mayor coste, aumentando los tiempos de indisponibilidad.

Comparación de indicadores según tipo

A continuación, se presenta, en la figura 68, los indicadores de la familia de electromedicina de monitorización, respiración, neonatología y oftalmología.

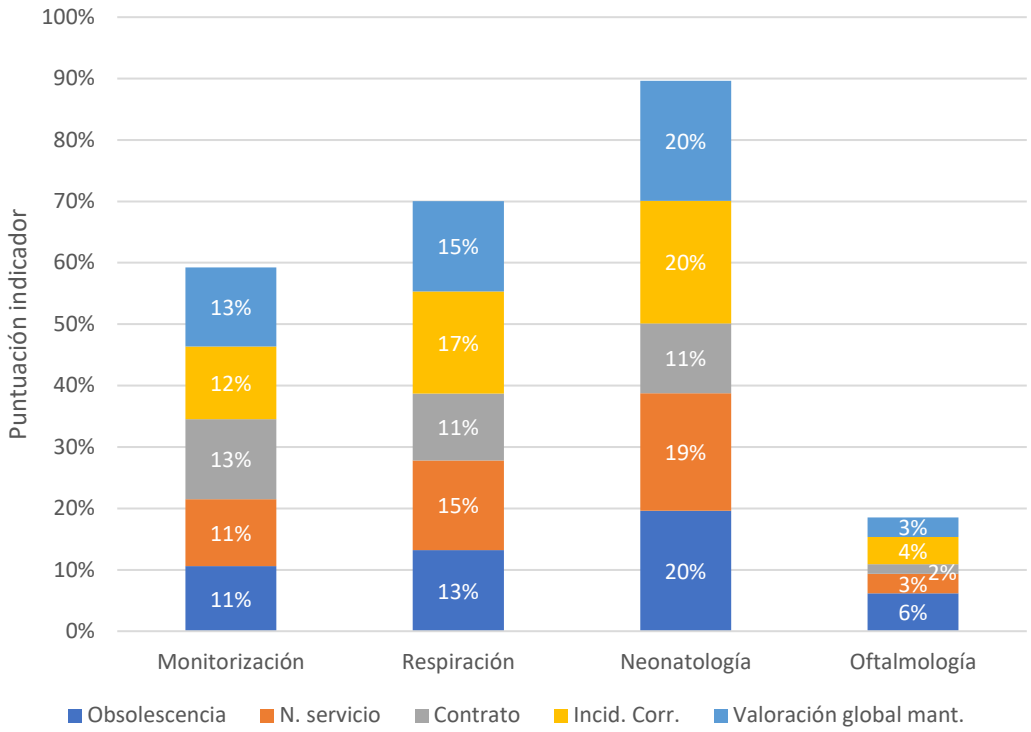


Figura 68. Indicadores de monitorización, respiración, neonatología y oftalmología

Monitorización: Los indicadores se encuentran en el rango del 11% al 13%. Puntúan un poco por encima el alcance del contrato y la valoración global.

Respiración: Obtiene puntuaciones desiguales, la más baja es la adecuación a contrato (11%) y la más alta el número de incidencias correctivas (17%), dado el uso intensivo que se hace de estos equipos. El alcance del contrato suele tener alta cobertura por ser equipos de soporte vital.

Neonatología: La mayoría de los indicadores tienen un valor aproximado del 20%, sin embargo, el alcance del contrato parece ser adecuado (11%). Estos equipos tienen una elevada incidencia de averías debido a su antigüedad, lo cual justifica la alta puntuación.

Oftalmología: Es de los que menos puntúa en todos los indicadores. El más elevado respecto de los otros, es la obsolescencia (6%), pero que aun así es bajo. Son equipos de reciente adquisición, los cuales todavía se encuentran en el periodo de garantía o tienen poca antigüedad.

En la figura 69 se comparan los indicadores de cirugía, endoscopia flexible y rígida y esterilización.

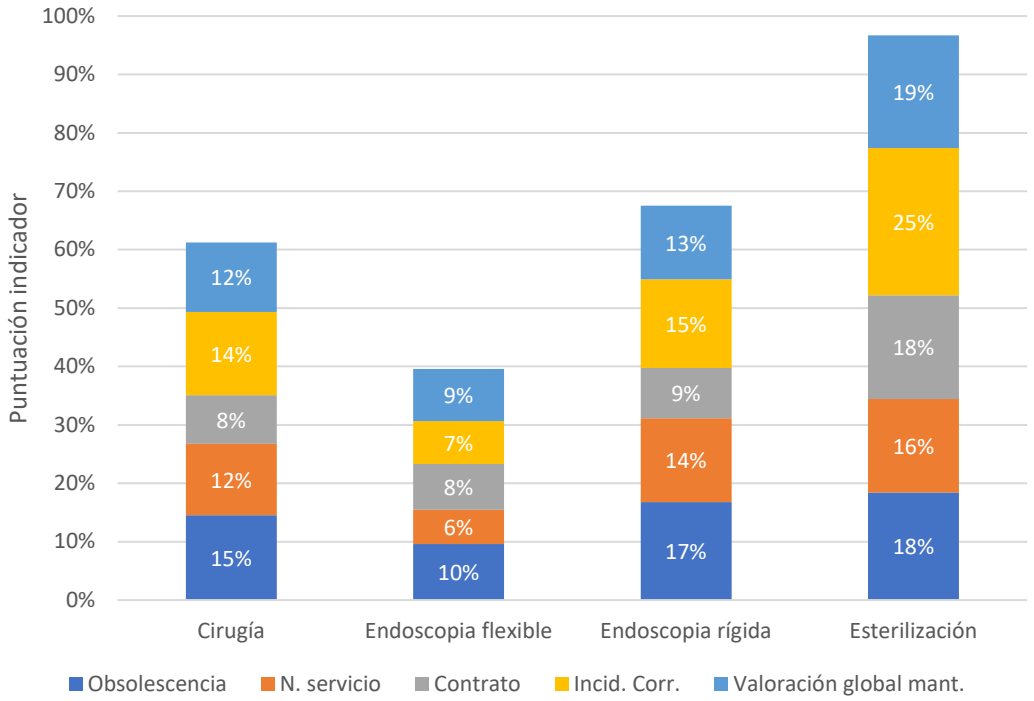


Figura 69. Indicadores de cirugía, endoscopia flexible y rígida y esterilización

Cirugía: El indicador que más puntúa es el de obsolescencia con un 15% y el menor el de adecuación de contrato (8%). Muchos de estos equipos son críticos en los procesos que participan, por lo que el contrato suele tener alta cobertura. No tienen un alto índice de averías.

Endoscopia flexible: Presenta puntuaciones en todos los indicadores inferiores al 10%. La mejor es la que valora el nivel de servicio (6%). Este servicio fue parcialmente externalizado. Los equipos existentes tienen poca antigüedad e intensidad de uso media.

Endoscopia rígida: Los indicadores tienen valores en torno al 15%. El menor es el de alcance de contrato con un 9%. La mayor puntuación se da en el indicador de obsolescencia con un 17%.

Esterilización: Es uno de los tipos que más puntúa en todos los indicadores. La mayoría se encuentran en el entorno del 18%. Destaca, sobre todo, el de incidencias correctivas (25%), dado que estos equipos por el tipo de proceso que realizan y su uso intensivo dan lugar a muchas averías.

La figura 70 muestra los indicadores de odontología, rehabilitación, neurología y diálisis.

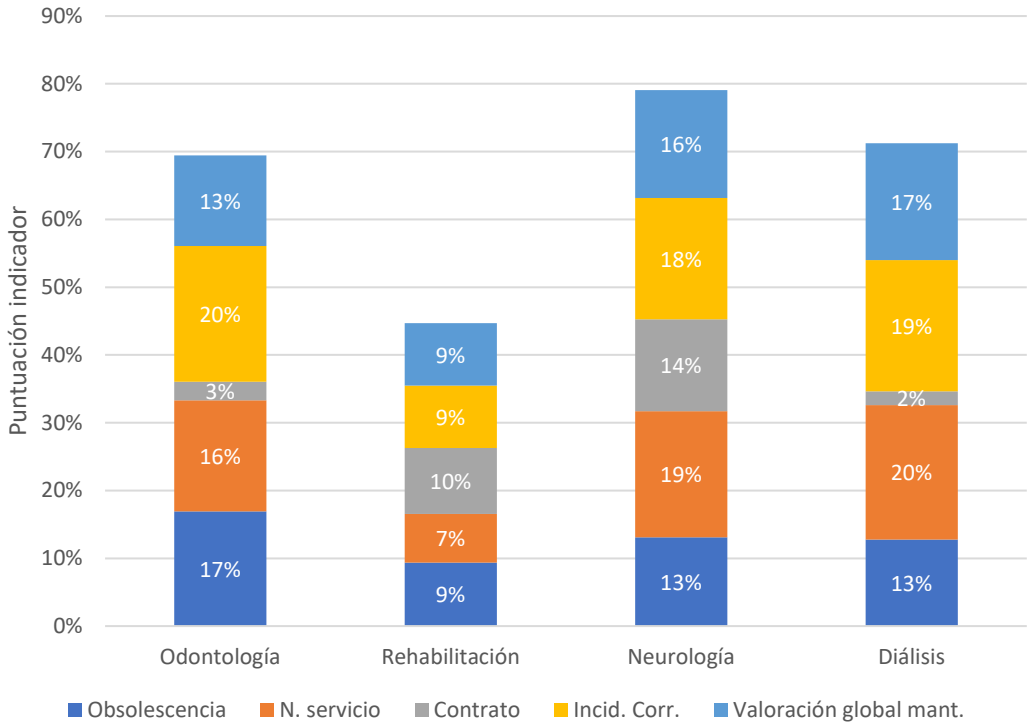


Figura 70. Indicadores de odontología, rehabilitación, neurología, diálisis

Odontología: Presenta cierta disparidad en la puntuación de los indicadores. El mayor es de incidencias correctivas con un 20%. El equipamiento de odontología se compone de pequeño material que se avería con bastante frecuencia.

Rehabilitación: Los indicadores de esta tipología tienen puntuaciones en el entorno del 10%. Los equipos que se usan son muy básicos, por lo que no tienen un elevado índice de fallos.

Neurología: Los indicadores oscilan entre el 13% y el 19%, siendo el peor puntuado el de nivel de servicio (19%), ya que existen muchas marcas y modelos distintos de equipos y un solo mantenedor generalista, que en determinadas ocasiones solo llega a realizar un mantenimiento de primera intervención, teniendo que enviar el equipo posteriormente al fabricante.

Diálisis: El indicador de contrato aparece muy bajo respecto del resto (2%), sin embargo, tiene puntuación alta en el nivel de servicio (20%) y en el número de incidencias (19%). Lo equipos de diálisis tienen un alto nivel de incidencias correctivas, lo cual genera tiempos de parada elevados.

Por último, se representa en la figura 71 los tipos de la familia de diagnóstico por imagen: digitalización, ultrasonidos, convencional y alta tecnología.

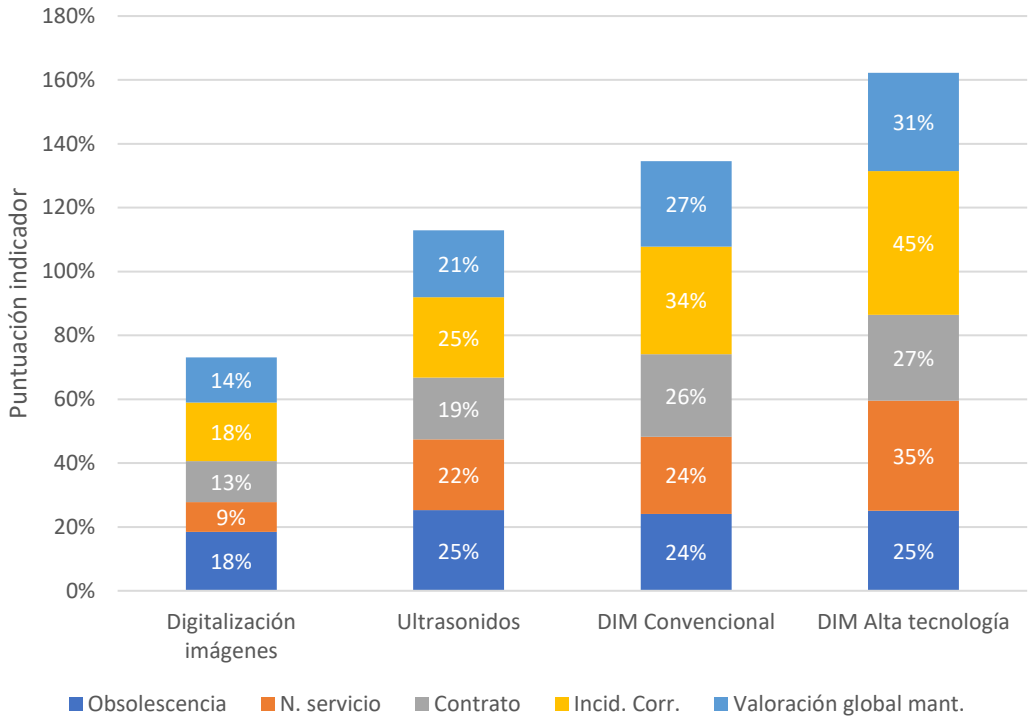


Figura 71. Indicadores de digitalización, ultrasonidos, convencional y alta tecnología

Digitalización de imágenes: El indicador con puntuación más baja es el nivel de servicio (9%). Los más altos son obsolescencia (18%) e incidencias correctivas (18%). Estos equipos se encuentran en fase de desaparición por el plan de renovación de máquinas de rayos x analógicas por otras digitales que no necesitan dispositivos de revelado.

Ultrasonidos: Presenta altas puntuaciones en torno al 20%. Las más altas son la obsolescencia (25%) y las incidencias correctivas (25%). Son equipos antiguos con alta tasa de incidencias, sobre todo en sondas.

Convencional: Todos los indicadores tienen valores superiores al 24%. El más alto es el de incidencias correctivas (34%). Estas máquinas tienen un alto número de averías y costes de reparación. La obsolescencia también es elevada por lo que contribuye a un mayor número de incidencias.

Alta tecnología: Es el tipo con valores más altos de todos los analizados. Destacan el nivel de servicio (35%) y el número de incidencias (45%). Son equipos complejos con numerosas incidencias de alto coste.

4.3.4.3 Análisis de indicadores por departamento

La tabla 54 contiene los valores de los indicadores según el departamento al que se encuentran asociados lo equipos. Aunque los nombres de los departamentos coincidan, en algunos casos, con los de la tipología correspondiente no se debe entender que hacen referencia al mismo grupo.

	Obsoles-cencia	**Nivel de Servicio**	**Contrato**	**Incid. Correc**	**Valoración Global Mantenimiento**
Diagnóstico por imagen	12,04%	10,66%	9,52%	11,88%	9,64%
Oncología	13,63%	4,62%	13,53%	12,90%	11,96%
UCI Adultos	10,41%	10,68%	8,85%	12,47%	11,54%
Maternidad	17,48%	10,71%	13,40%	17,29%	17,07%
UCI Pediátrica	16,95%	14,65%	11,82%	16,95%	17,72%
Hospitalización	8,02%	9,16%	15,46%	9,55%	11,43%
Reproducción	8,00%	1,95%	6,45%	5,86%	6,64%
Quirófano	15,64%	13,97%	11,12%	17,43%	14,03%
Consultas	8,69%	10,36%	6,15%	9,11%	9,18%
Urgencias	10,87%	10,02%	13,65%	11,88%	12,40%
Endoscopia	11,83%	9,65%	7,87%	11,72%	11,07%
Rehabilitación	9,76%	7,90%	10,41%	9,88%	10,17%
Laboratorio	7,18%	1,27%	6,32%	5,03%	4,89%
Hemodinámica	18,07%	10,63%	12,08%	21,32%	15,17%
Diálisis	11,51%	23,04%	1,76%	16,61%	16,50%

Tabla 54. Indicadores según departamento

En la segmentación de indicadores por departamento, la función de los equipos no es homogénea, sino que en cada área hay una mezcla de tipos, que en distintas proporciones se combinan según del proceso que se desarrolle.

Tampoco se puede usar la clasificación del primer nivel o por familias, incluso aunque haya departamentos que mayoritariamente incorporen equipos de una familia en particular. Por ejemplo, la mayoría de los equipos de diagnóstico por imagen estarán asociados al departamento de diagnóstico por imagen, pero no de forma exclusiva, ya que también se pueden encontrar en quirófanos, unidades de cuidados intensivos, consultas, urgencias, hemodinámica o unidad de reproducción.

El análisis por departamentos permite relacionar el proceso asistencial con la función realizada por los equipos que forman parte de él, a través de los indicadores. Los valores de los indicadores deben interpretarse de forma diferente a los de tipología, incluso en áreas en los que haya una proporción de equipos mayoritariamente del mismo tipo.

IND1: Indicador de obsolescencia

Se presentan los resultados del indicador de obsolescencia según la segmentación departamental en la figura 72.

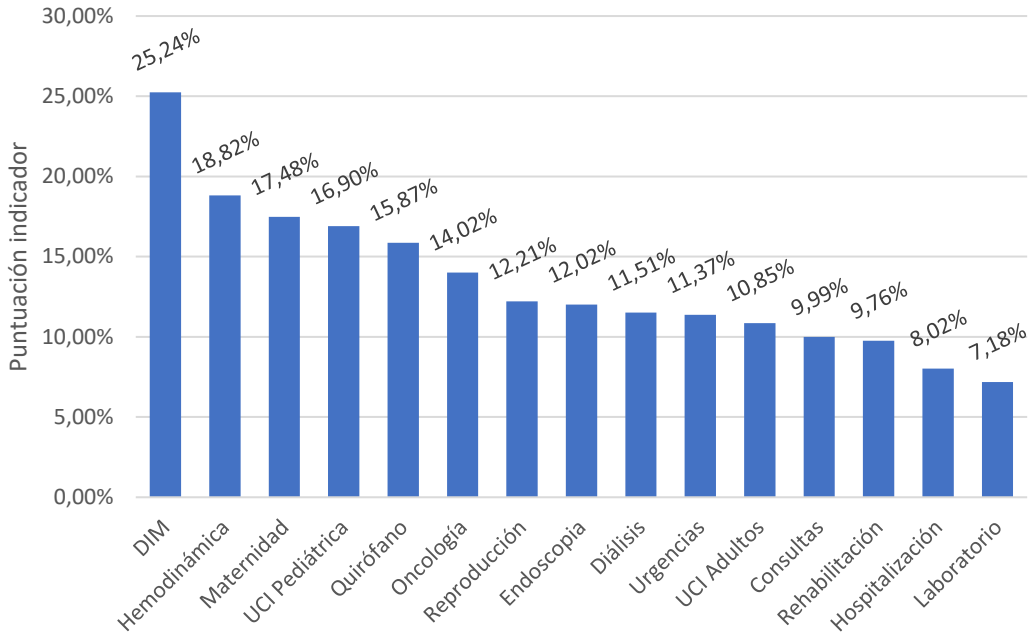


Figura 72. Indicador de obsolescencia según departamento

Los valores para el indicador de obsolescencia varían en el rango del 7% al 25%. Los más altos se corresponden con los departamentos de diagnóstico por imagen (25%) y hemodinámica (19%), ambos pertenecientes mayoritariamente a la familia de diagnóstico por imagen. Le siguen los departamentos de hospitalización de maternidad y UCI pediátrica con el 17% en ambos casos. Por debajo del 10% se encuentra laboratorio (7%), hospitalización (8%), rehabilitación (10%) y consultas (10%).

El departamento de diagnóstico por imagen y el de hemodinámica poseen equipos con antigüedad media, sin embargo, el número de reparaciones y su coste también resulta elevado, lo que puede dar lugar a un envejecimiento prematuro. Son procesos de uso intensivo que en algunos casos llegan a un funcionamiento superior a las 100 horas semanales.

Por otro lado, tanto el departamento de maternidad y UCI pediátrica obtienen puntuaciones altas debido a la antigüedad de los equipos y no tanto por los costes de reparación o número de incidencias.

IND2: Indicador de nivel de servicio

En la figura 73 se representan los valores del indicador de nivel de servicio según la división de departamento.

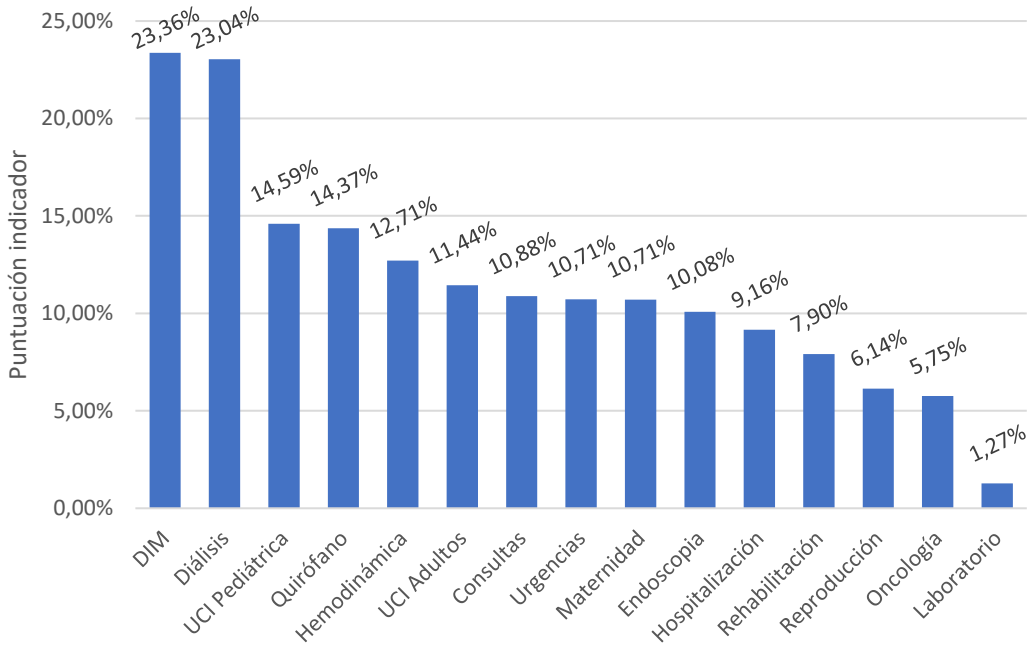


Figura 73. Indicador de nivel de servicio según departamento

El departamento de diagnóstico por imagen (23%) es el que tiene la mayor puntuación junto con el de diálisis (23%). El siguiente valor se corresponde con la UCI pediátrica (15%), manteniendo una diferencia de 8 puntos porcentuales respecto de los dos anteriores. El resto de departamentos tienen valores que van desde el 14% al 6%, a excepción del laboratorio que tiene un porcentaje sensiblemente inferior (1%).

El departamento de diagnóstico por imagen se ve afectado por el número de incidencias correctivas producidas y sus tiempos de resolución, lo cual se traduce en periodos de alta indisponibilidad de los equipos, con un impacto relevante en la facturación del hospital, ya que se produce un lucro cesante asociado a cada avería.

En el caso de la diálisis la frecuencia con la que se producen las averías es lo que hace que el indicador sea elevado. En este caso, no hay un impacto en facturación debido a que el número de equipos es elevado y siempre hay equipos disponibles para atender la demanda.

IND3: Indicador de alcance de contrato

La figura 74 contiene los valores del indicador de alcance de contrato según la segmentación por departamento.

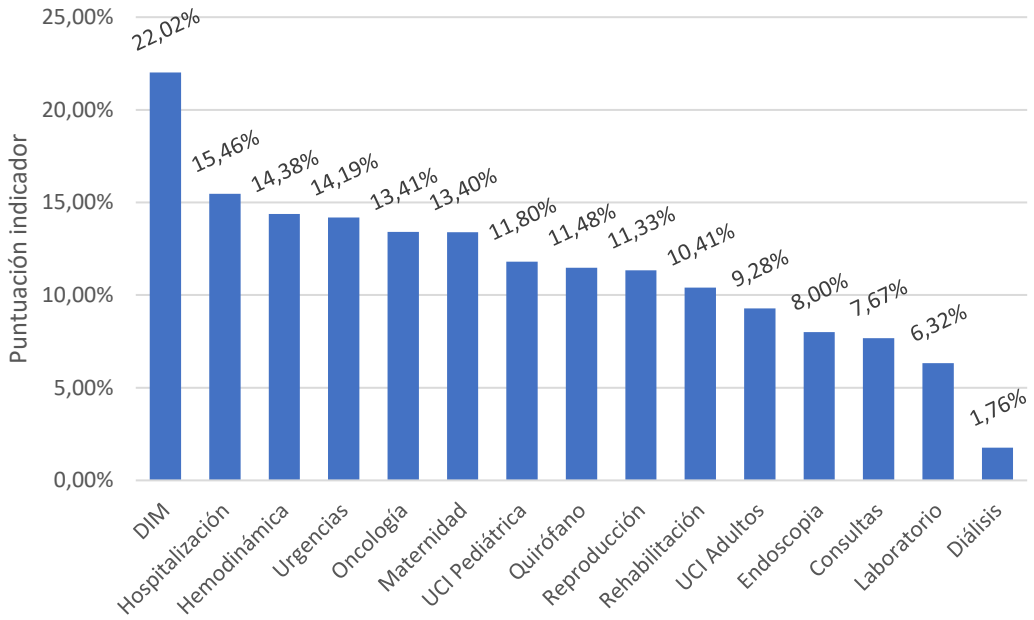


Figura 74. Indicador de alcance de contrato según departamento

El valor más alto se corresponde el departamento de diagnóstico por imagen con un 22%, seguido con una diferencia de 7 puntos porcentuales por el de hospitalización (15%). Las puntuaciones más bajas se dan en diálisis (2%), laboratorio (6%), consultas (8%) y endoscopias (8%). El resto de departamentos obtienen puntuaciones entre el 9% y el 14%.

En este indicador influye el coste de las averías, el contrato y el valor de compra. Al igual que en los indicadores anteriores el departamento de diagnóstico por imagen obtiene altas puntuaciones. Son equipos con un alto coste de contrato, numerosas averías y con elevados costes de reparación.

Un valor elevado en este indicador sugiere que se debe revisar el alcance del contrato o al menos la proporción entre los costes fijos y variables. Para el diagnóstico por imagen y hospitalización se debe valorar si el alcance de mano de obra es el adecuado o se debería aumentar a integral.

El valor de diálisis no es representativo porque los equipos se adquirieron hace menos de tres años y todavía influye el periodo de garantía en el que no existe coste de contrato.

IND4: Indicador de nivel de incidencias correctivas

El indicador de nivel de incidencias correctivas según departamento se representa en la figura 75.

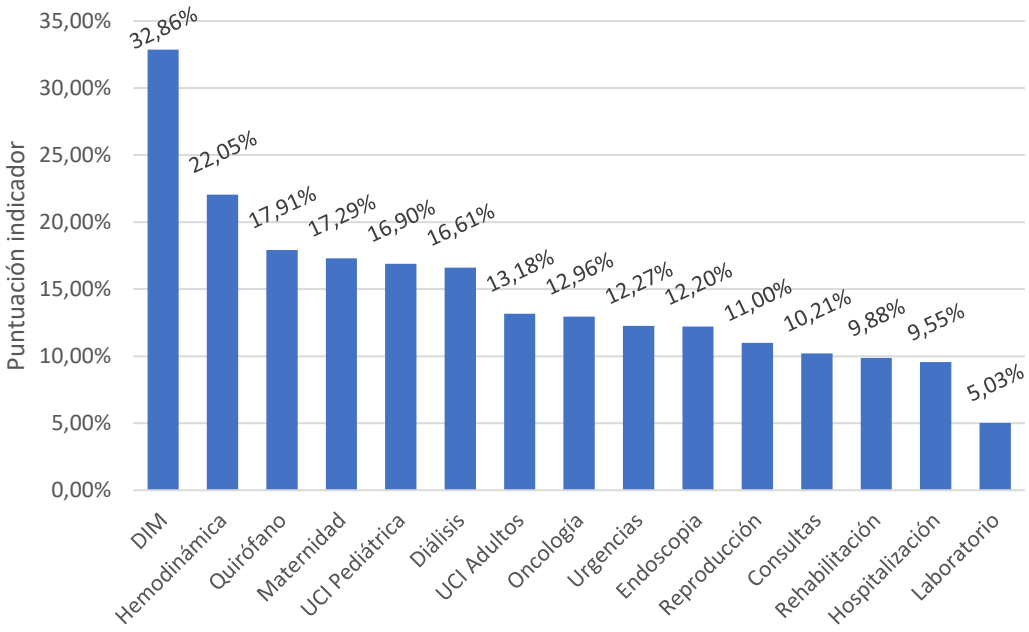


Figura 75. Indicador de nivel de incidencias según departamento

Desatacan en este indicador, con bastante diferencia sobre el resto, el departamento de diagnóstico por imagen (33%), seguido por el de hemodinámica (22%) y el de quirófano con el 18%. Los tres departamentos siguientes maternidad, UCI pediátrica y diálisis comparten el mismo valor con un 17%. El valor más bajo es el de laboratorio con un 5%, seguidos con puntuaciones en torno al 10% consultas, rehabilitación y hospitalización. Los demás tienen valores entre el 11% y el 16%, destacando diálisis (16%) y UCI de adultos (13%).

Este indicador cuantifica el número de averías que tienen los dispositivos y su indisponibilidad. El departamento de diagnóstico por imagen y el de quirófano tienen un importante número de incidencias debido a la complejidad de los equipos y su intensidad de uso. En el caso de maternidad y UCI pediátrica es el nivel de obsolescencia el que da lugar a un mayor número de incidencias correctivas, así como un mayor coste asociado a las reparaciones. Por otro lado, el departamento de diálisis tiene una puntuación elevada por el elevado número de incidencias debido al tipo de tecnología y funcionamiento que poseen estos equipos.

IND5: Indicador valoración global del mantenimiento

La figura 76 muestra el indicador de valoración global del mantenimiento.

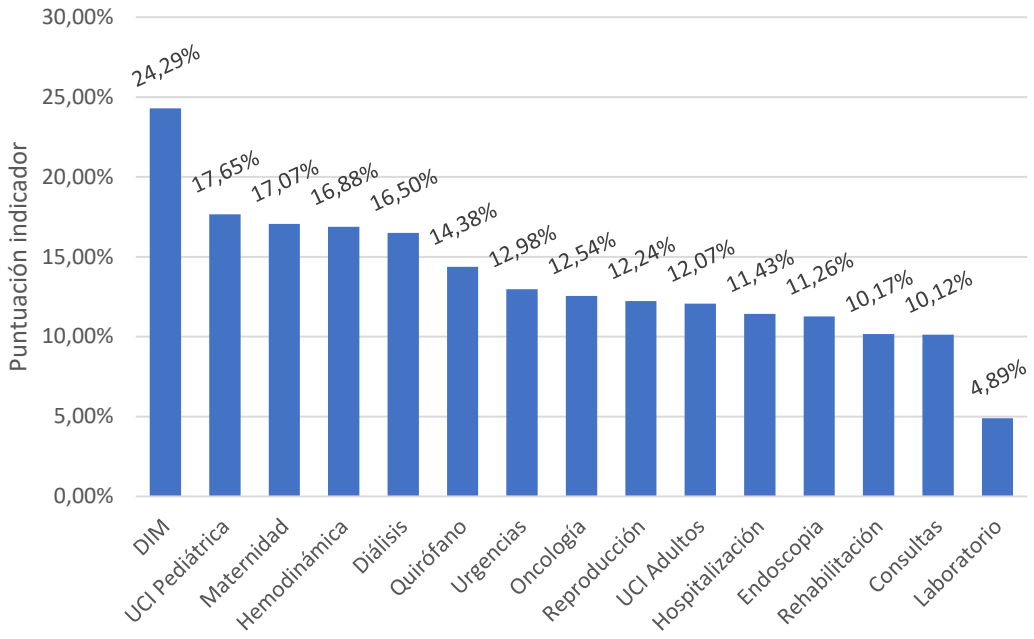


Figura 76. Indicador de valoración global del mantenimiento según departamento

El departamento de diagnóstico por imagen tiene la mayor puntuación con un 24%, seguido por el UCI pediátrica (18%) y hospitalización de maternidad, hemodinámica y diálisis con un valor compartido del 17%. Los valores más bajos se corresponden con laboratorio (5%), consultas (10%) y rehabilitación (10%). En resto están comprendidos entre el 11% y el 14%, cuyos valores más altos se dan en quirófano y urgencias.

El departamento con puntuación más alta es el de diagnóstico por imagen porque tiene altos valores en costes correctivos, elevado número de incidencias y altos periodos de indisponibilidad.

En los departamentos de UCI pediátrica y maternidad es posible que la antigüedad esté afectando a la valoración global del mantenimiento, ya que empieza a haber averías más costosas y frecuentes. Por otro lado, en los próximos años, en el departamento de diálisis los equipos finalizarán su periodo de garantía y habrá que incluir un contrato, lo cual puede hacer que la puntuación de indicador cambie.

Comparación de indicadores según tipo

En la figura 77 se representan las puntuaciones de los indicadores de los departamentos de diagnóstico por imagen, oncología, uci de adultos y hospitalización.

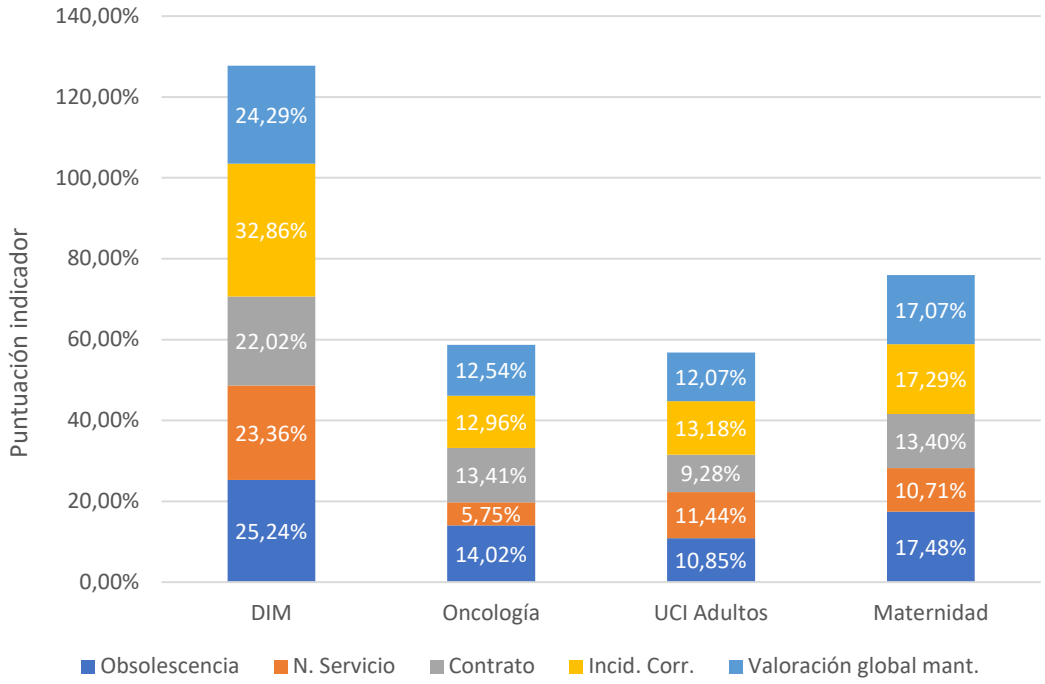


Figura 77. Indicadores de DIM, oncología, uci de adultos y hospitalización

Diagnóstico por imagen: Destaca el indicador de incidencias correctivas con un 35%. El más bajo es el de contratos (22%). El resto de indicadores tienen puntuaciones en torno al 24%. En este departamento están instalados la mayoría de los equipos de diagnóstico por imagen, los cuales tienen elevado índice de averías, costes elevados de reparación y antigüedad alta.

Consultas de oncología: Todos los indicadores se encuentran en torno al 13%, excepto el nivel de servicio que tiene un valor del 6%. El más elevado es la obsolescencia (14%). Es un departamento con pocos equipos que tienen una intensidad de uso media.

UCI de adultos: Los indicadores se encuentran en un rango estrecho entre el 9% y el 13%. El mayor se corresponde con el de incidencias correctivas. Se compone fundamentalmente de equipos de soporte vital con coberturas elevadas de contrato y equipos de monitorización.

Hospitalización de maternidad: La obsolescencia, incidencias correctivas y valoración global comparten el valor del 17%. El de nivel de servicio es el 11%. Son equipos de tecnología básica que tienen elevada antigüedad, lo cual da lugar más averías y peor valoración global del mantenimiento.

La figura 78 muestra los indicadores de los departamentos de UCI pediátrica, hospitalización, unidad de reproducción y quirófano.

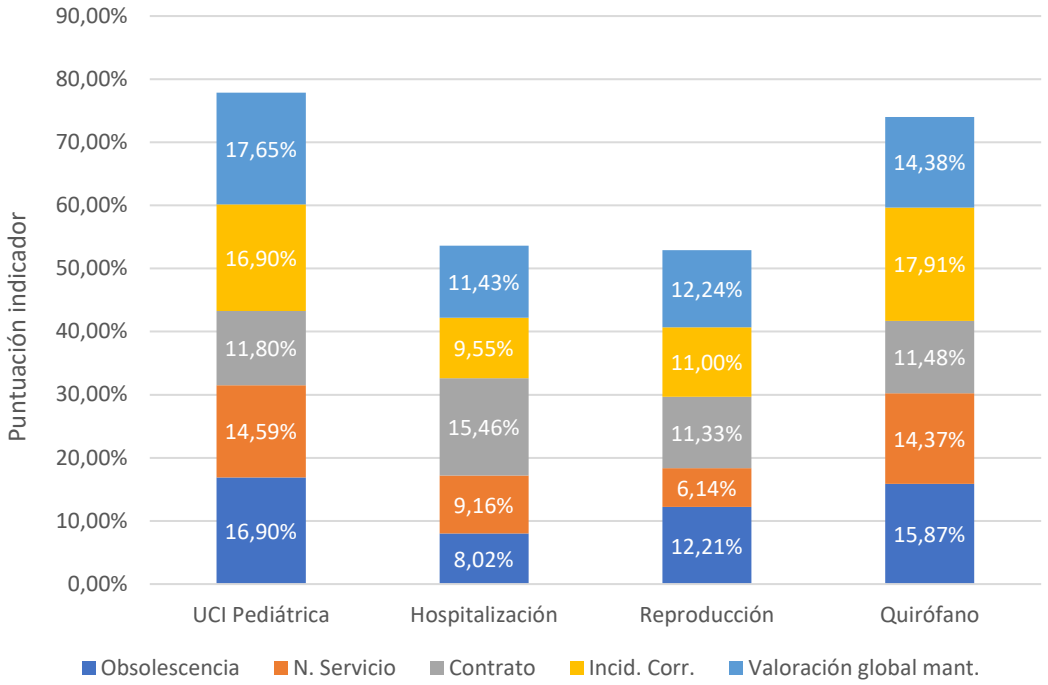


Figura 78. Indicadores de UCI pediátrica, hospitalización, reproducción y quirófano

UCI pediátrica: El indicador más alto es valoración global (18%), seguido de obsolescencia (17%) e incidencias correctivas (17%). El menor es la adecuación de contrato (12%). Al igual que la UCI de adultos, se compone de equipos de soporte vital con una cobertura adecuada y equipos de monitorización. El uso 24 horas de muchos de los equipos, unido a su antigüedad hace que el número de incidencias sea elevado.

Hospitalización: Casi todos los valores están en torno al 10%, excepto el de adecuación de alcance de contrato con un 15%. Son equipos relativamente nuevos con intensidad de uso media. El alcance del contrato es limitado por el tipo de tecnología, por lo que la alta puntuación es indicativa de que puede ser necesario aumentar la cobertura.

Unidad de reproducción: Cuatro de los indicadores tienen puntuación de 11%-12%. El nivel de servicio tiene un 6%. La mayoría son equipos de laboratorio de diferentes marcas, lo cual dificulta unificar los proveedores de mantenimiento.

Quirófano: Las puntuaciones se distribuyen entre el 18% del indicador de incidencias correctivas y la mínima de alcance de contrato con el 11%. El bloque quirúrgico es otra de las zonas en las que el uso de los equipos es intensivo y con tecnologías más complejas. El indicador de incidencias correctivas es elevado debido al uso intensivo del equipamiento y un nivel de obsolescencia en aumento.

La figura 79 muestra los indicadores de consultas, urgencias, endoscopias y rehabilitación.

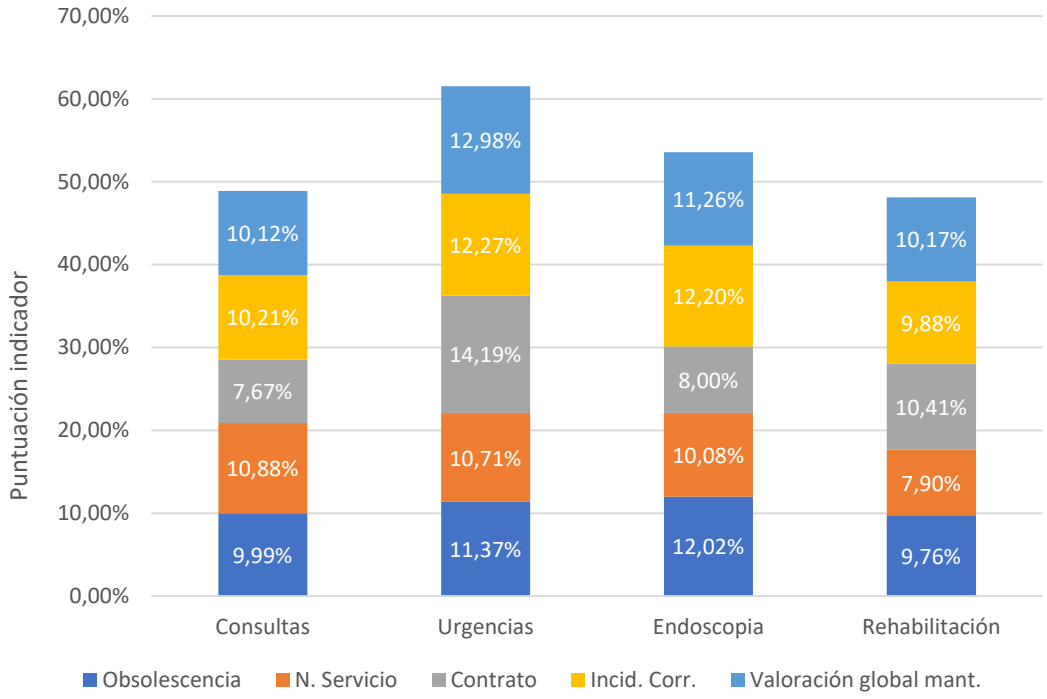


Figura 79. Indicadores de consultas, urgencias, endoscopias y rehabilitación

Consultas: Los indicadores casi permanecen constantes alrededor del 10%, a excepción del alcance de contrato que tiene un valor del 8%. En este departamento existen equipos de monitorización de tecnología básica. El alcance del contrato se adecúa a la intensidad de uso y al coste de las reparaciones.

Urgencias: Es un tipo con puntuaciones en el rango del 11% al 14%. El mayor se corresponde con el alcance del contrato y el menor con el nivel de servicio. Este departamento tiene funcionamiento de 24 horas, por lo que los equipos tienen un mayor uso, aunque no necesariamente funcionan de forma continua. El indicador de contrato muestra que la cobertura puede ser básica.

Endoscopias: Los mayores son los indicadores de obsolescencia (12%) e incidencias correctivas (12%). El menor es el del alcance de contrato (8%). El número de incidencias suele ser elevado en estos departamentos, si bien en este caso, una parte del equipamiento tiene una gestión externalizada, por lo que el indicador no resulta muy alto.

Rehabilitación: Los valores de los indicadores se encuentran en el entorno del 11%, a excepción del nivel de servicio que es algo menor (8%). Son equipos básicos de intensidad media de uso.

Finalmente, se muestra la figura 80, que contiene los indicadores de laboratorio, hemodinámica y diálisis.

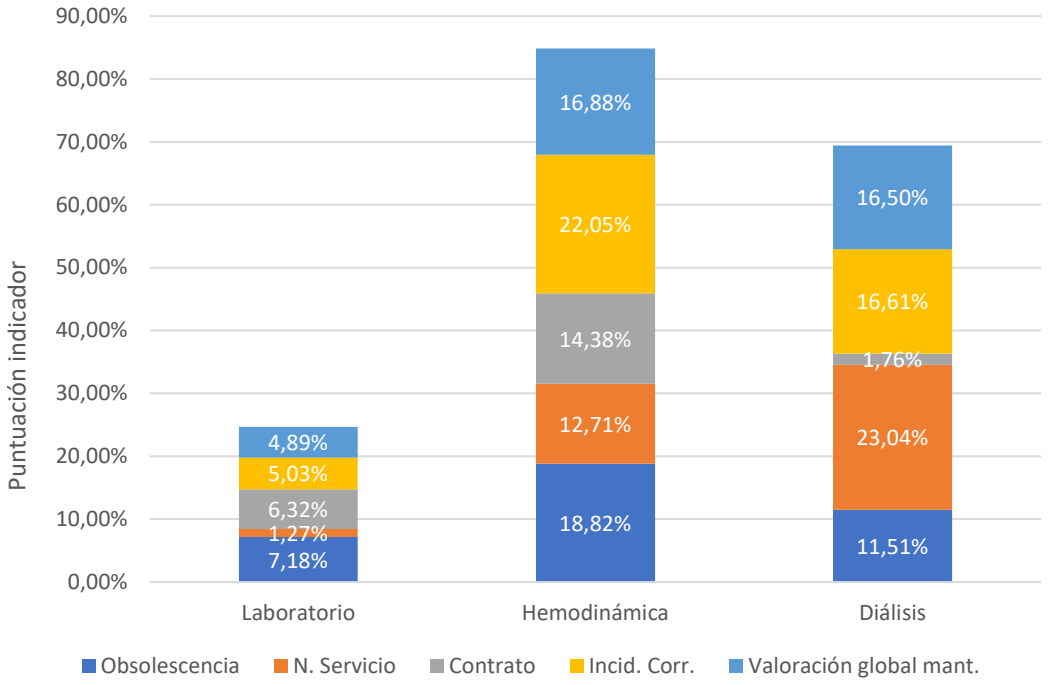


Figura 80. Indicadores de laboratorio, hemodinámica y diálisis

Laboratorio: La menor puntuación obtenida es la de nivel de servicio (1%) y la mayor la de obsolescencia (7%). Tiene valores muy bajos comparado con los otros departamentos debido a que muchos de los equipos son cesiones de los suministradores de fungible y esto hace que el número de dispositivos de gestión propia del hospital sea bajo. Por otro lado, este equipamiento no suele tener un alto índice de averías, a pesar de su uso continuo.

Hemodinámica: Presenta altas puntuaciones en todos los indicadores con un rango amplio entre el 13% y el 22%. Las más altos son las incidencias correctivas (22%) y la obsolescencia (19%). El valor más bajo se da en el nivel de servicio (13%). El equipo más relevante de este departamento es el angiógrafo, el cual es un equipo de radiología de alta tecnología con alto índice de incidencias. El nivel de obsolescencia de estos equipos también resulta elevado. El tipo de cobertura de contrato suele ser integral.

Diálisis: Las puntuaciones presentan una gran disparidad, mientras que indicador del alcance de contratos es del 2%, el nivel de servicio alcanza el 22%. El resto se sitúan entre el 12% y el 17%. Muchos de los equipos de este departamento se encuentran en garantía por la reciente creación del servicio.

4.3.4.4 Análisis de indicadores por subtipo

Además de los niveles de clasificación de familia y tipo, existe un tercer escalón denominado subtipo, que contiene 188 agrupaciones de equipos. La herramienta de análisis permite obtener los indicadores de cualquier subtipo o subconjunto de ellos.

Particularmente, se investiga el contenido por los tipos de radiología convencional, alta tecnología y ultrasonidos de la familia de diagnóstico por imagen por haber tenido altas puntuaciones en todos los indicadores en los análisis de los apartados anteriores.

En la tabla 55 se muestran los indicadores para los subtipos correspondientes a la tipología de ultrasonidos y diagnóstico por imagen convencional y de alta tecnología.

		Obsolescencia	**Nivel Servicio**	**Contrato**	**Incid. Corr.**	**Valoración Global Mant.**
Ultrasonidos	Ecógrafo	23,20%	20,29%	18,37%	22,86%	19,43%
	Ecocardiógrafo	33,40%	29,40%	23,21%	34,42%	27,17%
DIM Convencional	Mamógrafo	26,93%	34,98%	41,43%	47,45%	35,00%
	Convencional	38,84%	35,20%	36,07%	52,20%	40,57%
	Telemando	35,50%	56,20%	29,75%	62,35%	44,00%
	Densitómetro	20,95%	18,59%	22,86%	26,41%	20,55%
	Portátil	28,17%	29,17%	35,56%	45,44%	33,44%
	Arco radioquirúrgico	22,27%	32,77%	21,56%	38,89%	27,03%
	Ortopantomógrafo	19,05%	24,23%	22,23%	30,27%	23,82%
	Intraoral	17,87%	6,18%	31,00%	10,76%	19,89%
	Tac dental	20,25%	16,50%	18,75%	29,63%	19,75%
DIM Alta tecnología	TAC	19,00%	20,85%	35,20%	33,00%	27,50%
	Resonancia magnética	34,08%	47,06%	25,92%	60,79%	37,63%
	Hemodinámica	12,43%	14,93%	25,50%	23,71%	20,71%
	TAC radioquirúrgico	6,00%	71,50%	18,50%	23,50%	27,00%

Tabla 55. Indicadores según subtipo

Se comprueba que a pesar de que todos los subtipos tienen una puntuación alta, no todos contribuyen de la misma manera a la puntuación total de la tipología. Este análisis es necesario para conocer exactamente la tipología de equipamiento sobre la que se debe actuar.

Particularmente, se observa que los subtipos que más contribución tienen son los equipos convencionales de rayos, telemandos y resonancias magnéticas. En los tres casos se ha investigado el nivel de obsolescencia como primera causa, si bien como las puntuaciones se mantienen altas en el resto de indicadores, también se han comprobado las dimensiones de coste, tiempo de resolución de averías e indisponibilidad.

IND1: Indicador de obsolescencia

En la figura 81 se presenta el indicador de obsolescencia para los subtipos seleccionados.

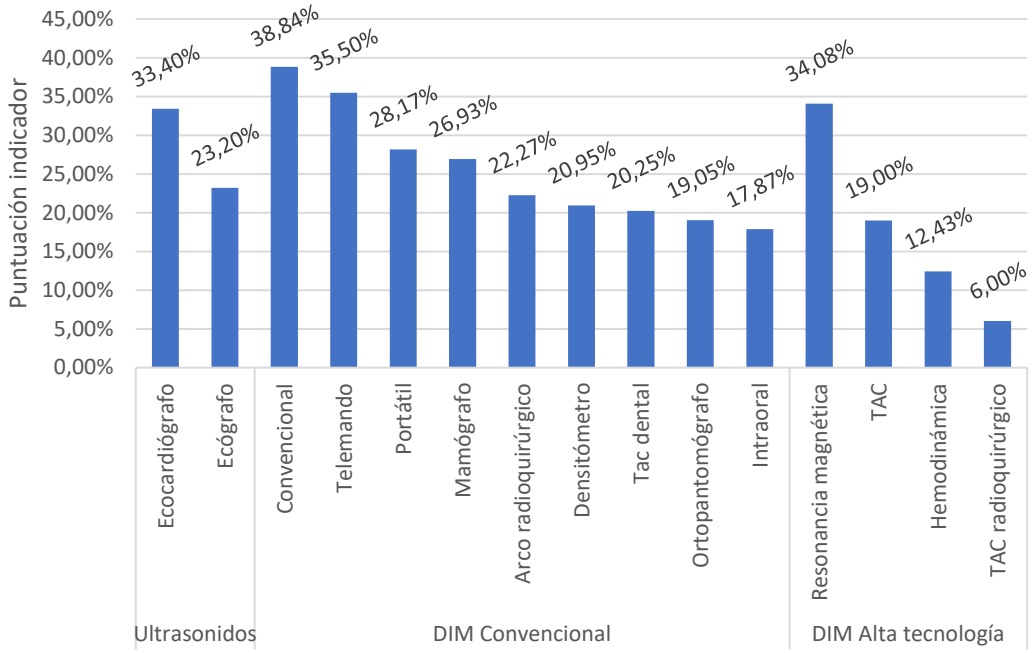


Figura 81. Indicador de obsolescencia según subtipo

Los subtipos con puntuación más alta son ecocardiografía (33%) para el tipo de ultrasonidos, convencional (39%) y telemando (36%) para el diagnóstico por imagen convencional y resonancia magnética (34%) para el tipo DIM de alta tecnología.

Los ecocardiógrafos son equipos que están en proceso de renovación por lo que sería esperable que este indicador baje en los próximos años. Se están actualizando para que puedan integrarse en un sistema remoto de almacenamiento de imágenes de ultrasonidos. Igualmente, los telemandos y los equipos convencionales se están actualizando dentro del plan de digitalización de equipos de rayos x.

Las resonancias magnéticas tienen una antigüedad superior a otros equipos debido a la alta inversión necesaria para su renovación, la cual hace que la vida útil de los equipos se alargue todo lo que se pueda. En algunos casos es necesario recurrir a proveedores generalistas de mantenimiento para los últimos años de funcionamiento del equipo, ya que el fabricante decide que no da más soporte a estas máquinas.

IND2: Indicador de nivel de servicio

Se presenta en la figura 82 las puntuaciones del indicador de nivel de servicio por subtipos.

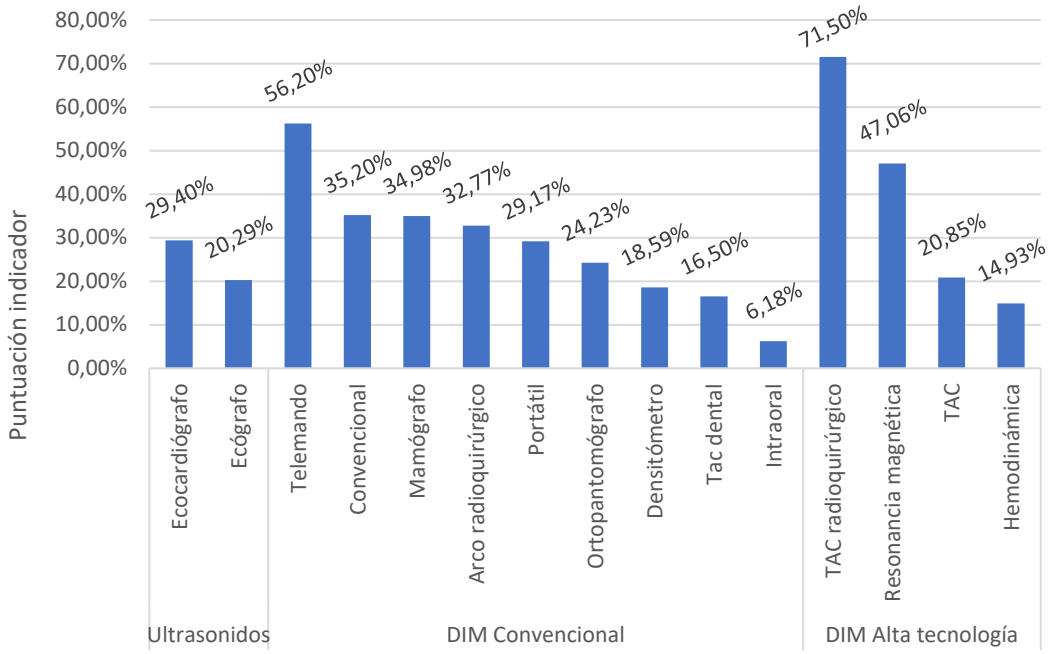


Figura 82. Indicador de nivel de servicio según subtipo

El subtipo de TAC radioquirúrgico es el que tiene la puntuación más alta (72%), dentro del tipo de diagnóstico por imagen de alta tecnología, seguido de resonancia magnética (47%). En la tipología de radiología convencional el equipo que más ha puntuado es el telemando con un 56%. Los subtipos de ultrasonidos no tienen valores muy elevados comparados con el resto.

El TAC radioquirúrgico es un subtipo con solo dos equipos, por lo que es necesario analizar las particularidades que han podido ocurrir con estos dos dispositivos. Concretamente se ha averiguado que han tenido varias averías que han generado largos tiempos de parada, aumentando así su indisponibilidad.

El subtipo telemando acumula muchas averías con largos tiempos de resolución debido a la falta de piezas por el grado de obsolescencia, lo cual hace que el nivel de servicio del proveedor baje. Las resonancias magnéticas tienen una puntuación elevada por los tiempos de indisponibilidad de los equipos, lo cual se debe a la frecuencia de las averías y algunas ocasiones indisponibilidad de los materiales de reparación.

IND3: Indicador de alcance de contrato

La figura 83 muestra las puntuaciones del indicador de alcance de contrato para los subtipos seleccionados de diagnóstico por imagen.

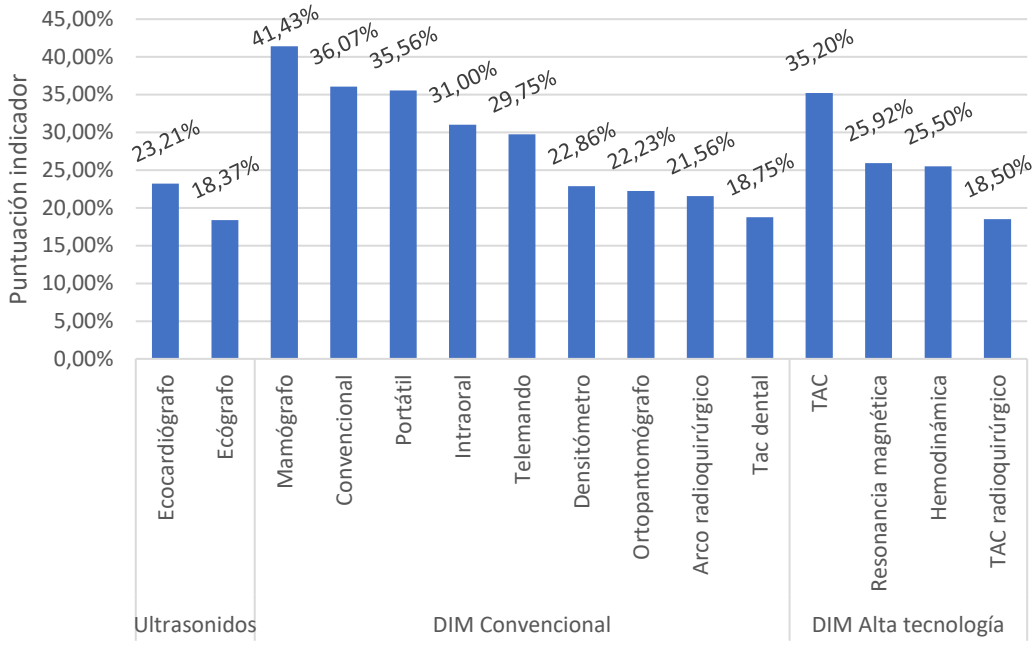


Figura 83. Indicador de alcance de contrato según subtipo

Los subtipos con puntuación más alta son los correspondientes al diagnóstico por imagen convencional con un 41% para los mamógrafos y un 36% para los equipos convencionales de rayos x y los portátiles. Para la alta tecnología, el valor más alto ha sido el TAC (35%). Los equipos de ultrasonidos tienen valores similares al resto de subtipos en el entorno de 20%.

En este indicador se valora si el alcance del contrato es el adecuado. Los subtipos analizados tienen tres niveles de cobertura: preventivo, mano de obra o integral. Estos porcentajes ayudan a decidir si el alcance actual del equipo es el óptimo en cuanto a costes. Un contrato de mayor cobertura también reduce los tiempos de tramitación y aprobación de presupuestos.

En el caso de los mamógrafos el alcance es integral. La puntuación es alta debido a que cuando se compara el valor del contrato con el valor del equipo el coste del contrato tiene una proporción elevada. Para los equipos convencionales y portátiles de rayos, se ha valorado aumentar el alcance del contrato a integral, ya que los correctivos tienen costes altos y la cobertura de preventivo más mano de obra puede resultar inadecuada.

IND4: Indicador de nivel de incidencias correctivas

En la figura 84 se representan las puntuaciones del indicador de nivel de incidencias correctivas.

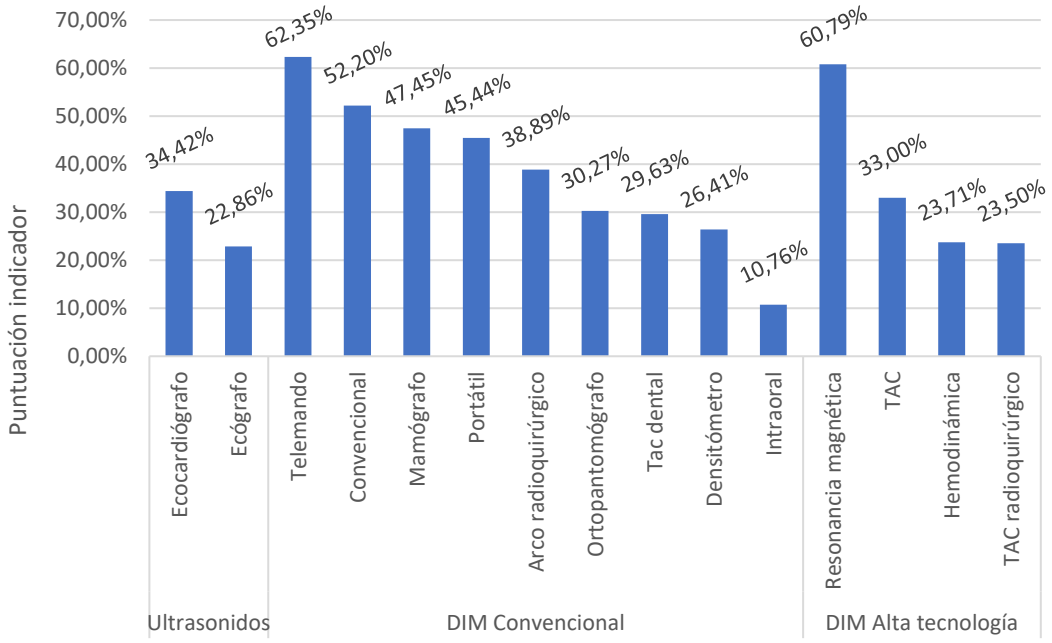


Figura 84. Indicador de nivel de incidencias correctivas según subtipo

En diagnóstico por imagen convencional las puntuaciones más altas son las del telemando (62%), convencional (52%), mamógrafo (47%) y portátil de rayos x (45%). En alta tecnología el valor más alto se corresponde con el equipo de resonancia magnética (61%), seguido de los TACs con un 33%. En los equipos de ultrasonidos el valor más alto se corresponde con los ecocardiógrafos con un 34%.

En general los equipos de diagnóstico por imagen tienen un uso intensivo por lo que el número de averías acaba siendo alto. Si además de lo anterior, se contempla la variable de obsolescencia se comprueba que aquellos subtipos con máquinas más antiguas tienen puntuaciones todavía más altas, por lo que actúa como un efecto multiplicador. Ese es el caso del telemando, convencional de rayos y resonancia magnética.

Para el tipo de ultrasonidos la diferencia entre ecocardiógrafos y ecógrafos, se debe a la intensidad de uso de los equipos y al tipo de sondas que utiliza cada uno, ya que en principio son máquinas con características similares que deberían tener valores parecidos.

IND5: Indicador valoración global del mantenimiento

Se muestra en la figura 85 los puntos obtenidos del indicador de valoración global del mantenimiento.

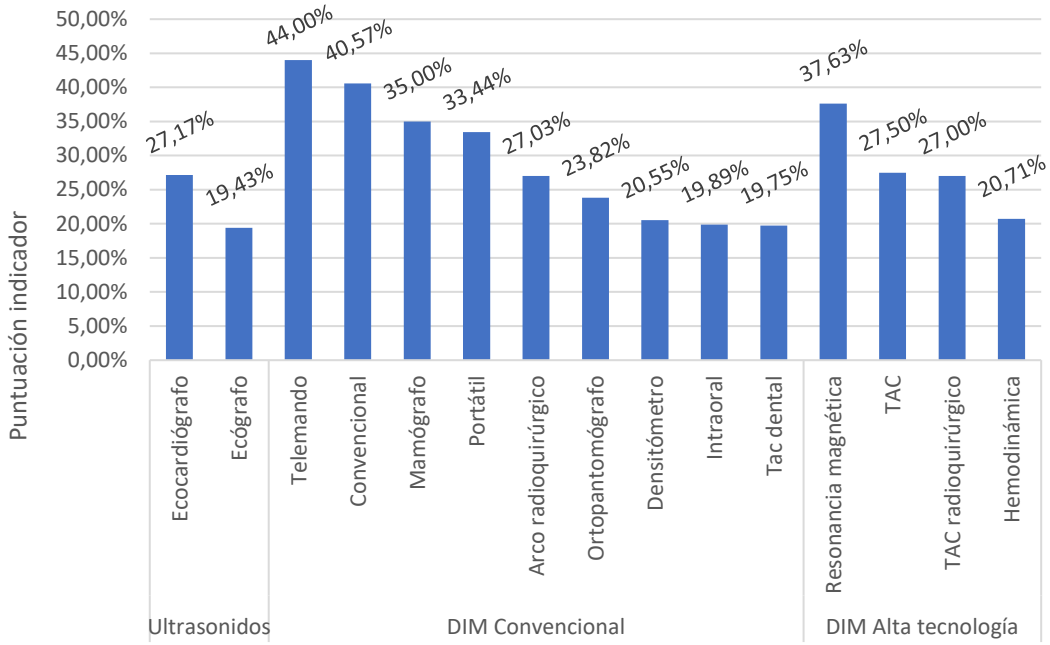


Figura 85. Indicador de valoración global del mantenimiento según subtipo

El telemando con el 44% y el convencional de rayos x con el 41% obtienen las mayores puntuaciones en el tipo de diagnóstico por imagen convencional, seguidos por la mamografía (35%) y portátiles de rayos x (33%). En alta tecnología, el mayor porcentaje se observa en el equipo de resonancia magnética con el 38%, seguido por el TAC (27%). En ultrasonidos el subtipo más puntuado es el ecocardiógrafo (27%).

El telemando junto con los convencionales de rayos x son equipos que tienen puntuaciones elevadas en todas las dimensiones del mantenimiento: número de incidencias, coste y tiempos de resolución e indisponibilidad del equipo, debido a que la antigüedad de estos equipos implica que aparezcan más averías y que sea más difícil obtener los repuestos.

El mamógrafo y resonancia magnética puntúan alto por el coste del mantenimiento y por el número de averías que tienen, que se acaba traduciendo en frecuentes periodos de indisponibilidad. Los ecocardiógrafos obtienen una puntuación elevada por el impacto que tiene frecuente sustitución de sondas de alto coste.

4.3.4.5 Análisis de indicadores por ordenación de subtipos

Es otra forma es explorar la información, mediante el uso de filtros y ordenación de resultados hasta un cierto número de corte o de presentación. Es una primera aproximación para el análisis de los subtipos que más alto puntúan, independientemente de otras clasificaciones de orden superior o por departamentos.

Mediante este sistema se presentan los subtipos de la familia de electromedicina ordenados de mayor a menor para las diez puntuaciones más altas de cada indicador. Este análisis debe complementarse con otras segmentaciones adicionales que permitan analizar subtipos relevantes como el número de equipos de la categoría, valor de compra, relevancia médica o coste del mantenimiento.

En la figura 86 se representan los subtipos de electromedicina con mayor puntuación para el indicador de obsolescencia.

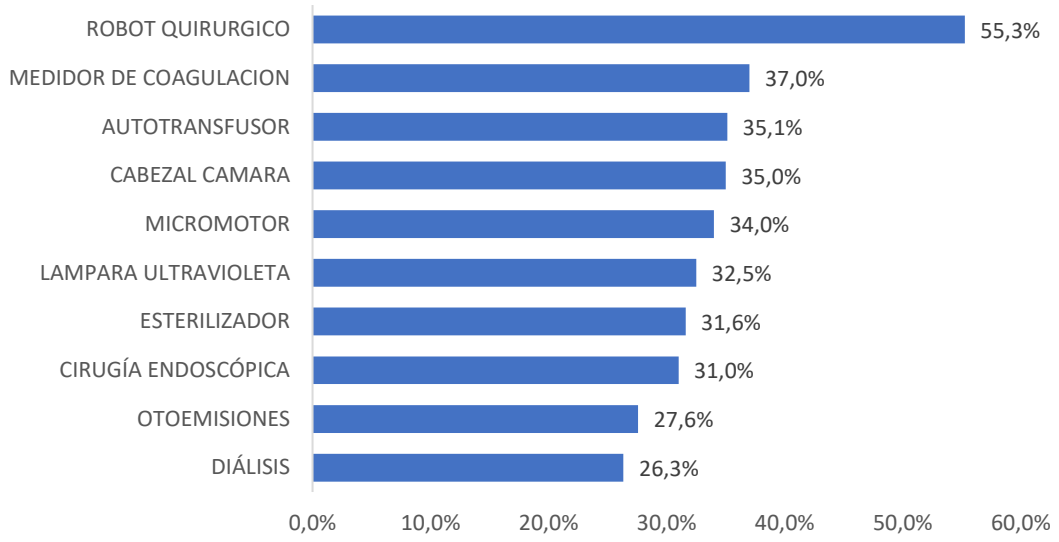


Figura 86. Ordenación subtipos de electromedicina: obsolescencia

El robot quirúrgico es un subtipo compuesto por dos equipos. Uno de ellos (en proceso de renovación) no tiene contrato de mantenimiento por encontrarse fuera del periodo en el que el mantenedor da soporte. El medidor de coagulación, cabezal de cámara o micromotor son tipos muy específicos de determinados servicios especializados. Sin embargo, el subtipo de esterilización es muy relevante en el proceso quirúrgico, ya que si no funciona correctamente paraliza el flujo de trabajo.

A continuación, se representa la figura 87 del indicador de nivel de servicio.

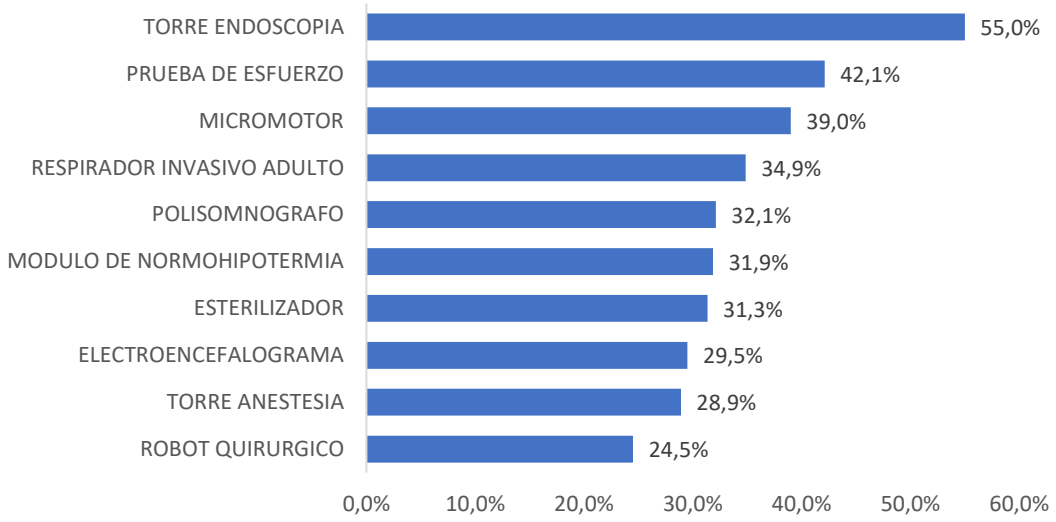


Figura 87. Ordenación de subtipos de electromedicina: nivel de servicio

El subtipo con peor nivel servicio son las torres de endoscopia, ya que los tiempos de resolución suelen alargarse debido al tipo de contrato que tienen. El respirador es un equipo de soporte vital que puntúa alto por los tiempos de indisponibilidad.

La figura 88 muestra la puntuación del indicador de alcance de contrato.

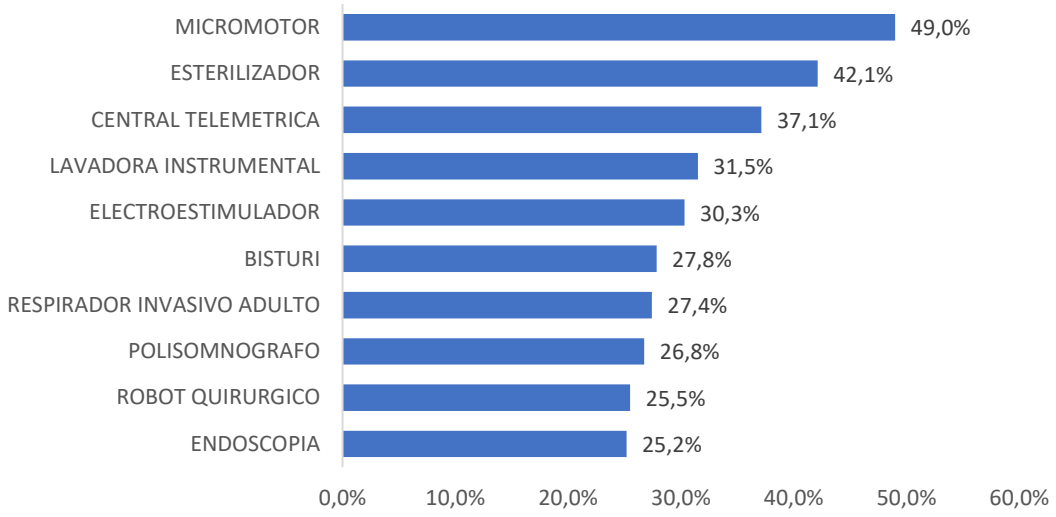


Figura 88. Ordenación de subtipos de electromedicina: alcance de contrato

De los subtipos relevantes cabe destacar los equipos de esterilización, bisturíes, respirador y equipos de endoscopia. Son equipos de uso generalizado en todos los hospitales. Se debe valorar aumentar el alcance del contrato en aquellos que tengan una cobertura de mano de obra como es endoscopias y bisturíes.

La figura 89 muestra la puntuación del indicador de nivel de incidencias correctivas.

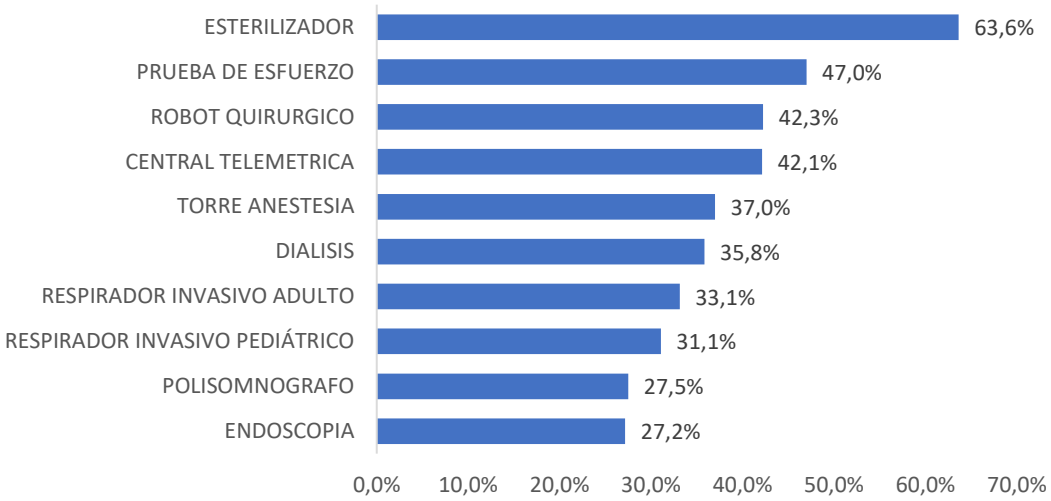


Figura 89. Ordenación de subtipos de electromedicina: nivel de incidencias correctivas

La esterilización es el subtipo que más puntúa en este indicador por el alto volumen de incidencias. Esto se ha visto reflejado en análisis anteriores por tipología y departamento. Se deben revisar los equipos de soporte vital como respiradores y torres de anestesia.

La figura 90 presenta el indicador de valoración global de mantenimiento.

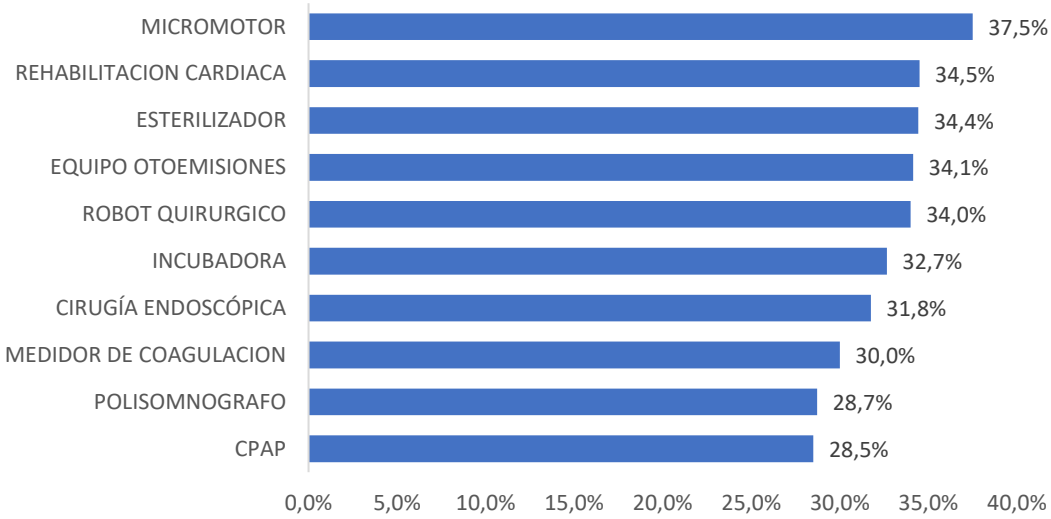


Figura 90. Ordenación de subtipos de electromedicina: valoración global mantenimiento

El subtipo más relevante a destacar es la esterilización por el uso generalizado en diferentes servicios y hospitales. En este gráfico la mayoría de las puntuaciones se encuentran en un rango muy estrecho entre el 28,5% y el 37,5%.

4.3.4.6 Análisis de indicadores por equipos individuales

La herramienta permite llegar al nivel de equipos individuales para el cálculo de indicadores y métricas.

En este caso se va a proceder a investigar los equipos particulares del subtipo de resonancia magnética y telemando por las puntuaciones tan altas que han obtenido en los apartados anteriores.

A continuación, se presenta la tabla 56 con los indicadores de los equipos incluidos en el subtipo de resonancia magnética.

		Obsoles-cencia	**Nivel Servicio**	**Contrato**	**Incid. Correc**	**Valoración Global Mantenimiento**
EQ1	GEHC	53,50%	68,50%	38,50%	90,00%	63,00%
EQ2	GEHC	63,50%	66,00%	30,50%	82,00%	50,00%
EQ3	GEHC	26,00%	37,50%	44,50%	64,50%	38,00%
EQ4	GEHC	35,00%	66,00%	28,50%	80,00%	42,00%
EQ5	GEHC	28,50%	58,50%	44,50%	72,00%	49,00%
EQ6	PHILIPS	65,00%	66,00%	35,00%	100,00%	61,00%
EQ7	PHILIPS	61,00%	63,50%	27,00%	100,00%	49,00%
EQ8	PHILIPS	65,00%	68,50%	35,00%	100,00%	61,00%
EQ9	PHILIPS	52,50%	68,50%	38,50%	90,00%	67,00%
EQ10	PHILIPS	37,50%	80,00%	28,50%	82,00%	51,00%
EQ11	PHILIPS	38,50%	80,00%	30,50%	82,00%	49,00%
EQ12	SIEMENS	52,50%	68,50%	38,50%	90,00%	61,00%
EQ13	SIEMENS	38,00%	16,00%	28,50%	61,50%	42,00%
EQ14	SIEMENS	15,00%	16,00%	34,50%	22,00%	13,00%
EQ15	SIEMENS	38,50%	100,00%	30,50%	82,00%	53,00%
EQ16	SIEMENS	12,00%	61,50%	28,50%	44,50%	37,00%
EQ17	SIEMENS	3,00%	6,50%	11,00%	5,50%	2,00%
EQ18	HITACHI	66,00%	36,00%	17,00%	67,50%	40,00%
EQ19	HITACHI	27,50%	56,00%	25,00%	72,00%	43,00%
EQ20	HITACHI	20,00%	22,00%	15,00%	36,00%	15,00%

Tabla 56. Indicadores de resonancia magnética

Se comprueba que el indicador de incidencias correctivas tiene valores muy elevados en algunos equipos, incluso del 100%, lo que indica que ha puntuado de forma máxima en todas las métricas que lo componen.

Los indicadores de obsolescencia, nivel de servicio y valoración global del mantenimiento tienen alcanzan valores por encima del 60% en numerosos equipos. El alcance de contrato es el más bajo puntúa de los cinco en su conjunto, rondando valores del 30%, ya que la mayoría de ellos tienen un contrato con cobertura integral.

Sin embargo, no se aprecian grandes diferencias por marcas. Llegado a este nivel de detalle se pueden analizar los indicadores para equipos individuales. De forma particular se observa que los equipos EQ6, EQ7 y EQ8 obtienen puntuaciones muy elevadas debido a su antigüedad.

En cuanto a los equipos del subtipo telemando se muestran los resultados en la tabla 57.

		Obsoles-cencia	**Nivel Servicio**	**Contra-to**	**Incid. Correc**	**Valoración Global Mant.**
EQ1	GEHC	74,50%	43,00%	50,50%	92,50%	71,00%
EQ2	GEHC	5,00%	73,50%	26,50%	15,00%	30,00%
EQ3	GEHC	25,00%	75,00%	25,00%	70,00%	46,00%
EQ4	MERATE	48,50%	68,50%	32,50%	90,00%	49,00%
EQ5	MERATE	27,50%	61,00%	30,50%	72,00%	42,00%
EQ6	MERATE	25,00%	58,50%	27,00%	70,00%	46,00%
EQ7	MERATE	35,00%	80,00%	28,50%	80,00%	45,00%
EQ8	MERATE	6,00%	44,00%	28,50%	28,50%	24,00%
EQ9	RADIOLOGIA	80,50%	18,50%	38,50%	71,50%	58,00%
EQ10	SIEMENS	28,00%	40,00%	36,50%	34,00%	29,00%

Tabla 57. Indicadores de telemando

El indicador de obsolescencia presenta cierta dispersión, ya que los porcentajes se encuentran en el rango del 5% al 81%, si bien se puede comprobar que la mayoría de las puntuaciones se sitúan por debajo del 50%. Solo en dos equipos se encuentran en el 75%y 81% respectivamente.

En cuanto al indicador de nivel de servicio es alto en la mayoría de los casos. Este parámetro valora la actuación del proveedor a través de los tiempos de actuación. Es un proveedor multimarca el que asume el mantenimiento de todos los equipos. Los valores son altos independientemente de la antigüedad del equipo. Se debe confirmar si el proveedor tiene capacidad para atender las incidencias de los diferentes equipos.

El indicador de contratos sitúa la mayoría de sus puntuaciones en torno al 30% con un valor máximo del 51%. El alcance del contrato de todos los telemandos es de mano de obra con piezas excluidas. Esta cobertura traslada un coste importante a la parte variable cuando hay que sustituir el tubo de rayos o el *flat panel*. Se ha propuesto valorar si en un horizonte de tiempo largo compensa elevar la cobertura a integral y reducir la parte de costes bajo presupuesto.

El indicador de incidencias correctivas es el que alcanza puntuaciones más elevadas para todos los equipos hasta el 90%. Son equipos con un nivel de incidencias muy elevado. Tienen un uso intensivo y el nivel de obsolescencia no es despreciable. Debe valorarse si los equipos son lo suficientemente robustos en próximas compras.

Las puntuaciones en la valoración global del mantenimiento se sitúan en el entorno del 40%. Son equipos que puntúan alto en la mayoría de las dimensiones de mantenimiento. Se debe plantea una revisión que incluya la compra, mantenimiento y uso del equipo.

4.3.5 Valor añadido para otros procesos

En los apartados anteriores se ha realizado un análisis en profundidad de la información obtenida de la base de datos de mantenimiento del equipamiento electromédico, cuyas conclusiones tienen aplicación directa en el departamento de ingeniería de hospital a través de la evaluación de costes, contratos y desempeño del mantenedor.

Sin embargo, se comprueba que parte de los resultados obtenidos tienen valor para otras áreas del hospital diferentes a la de ingeniería, debido a la interrelación que tienen todos los procesos hospitalarios.

Área de compras

Este tipo de análisis permite establecer planes de renovación basados en el nivel de obsolescencia del equipamiento. Si el área de compras puede anticipar determinadas adquisiciones y establecer un plan de compra es posible obtener mejoras en precio o lanzar licitaciones que abarquen horizontes temporales superiores a la anual.

Pueden obtener información para evaluar si la adquisición de determinadas marcas o modelos de equipos resultan adecuados al uso hospitalario o tienen la robustez y durabilidad para la intensidad de uso requerida.

Área asistencial

Se pone de manifiesto en este análisis cómo el uso de los equipos influye en el número de averías y tiempo de indisponibilidad de los equipos. El usuario clínico puede dar lugar a un mal uso de los dispositivos por falta de formación, presión asistencial o descuido, lo cual genera ineficiencias en sus propios procesos y costes adicionales en el servicio de mantenimiento.

Área financiera

El departamento financiero se puede beneficiar de este análisis a través de un mejor control presupuestario y del gasto de mantenimiento. El presupuesto de gasto variables es difícil de predecir, por lo que cualquier información que ayude a establecer pautas por departamentos, servicios, procesos, proveedores o estacionalidad permitirá un mejor control de los flujos monetarios y de financiación.

Gerencia

Una de las funciones de la dirección es establecer planes a largo plazo sobre las cuestiones estratégicas que afectan al centro. La información del mantenimiento electromédico debe incorporarse a estos planes debido al impacto que tiene en muchos de los procesos asistenciales.

5. CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones generales

Los resultados de esta investigación han cumplido con el objetivo de analizar diferentes procesos hospitalarios con el fin de proponer soluciones contrastadas de valor añadido para el área de ingeniería, mantenimiento electromédico y procesos asistenciales, así como para los gestores y diseñadores de los centros hospitalarios.

Se ha comprobado que es posible aumentar la eficiencia de determinados procesos mediante la aplicación de técnicas de Ingeniería Hospitalaria y de metodología *Lean*. Se han propuesto soluciones que permiten mejorar su productividad hasta un 12%, logrando importantes ahorros y/o nuevos ingresos que revierten en el conjunto del sistema.

Se ha confirmado la necesidad de potenciar la especialización de Ingeniería Hospitalaria a través de programas específicos de formación con el fin de abordar proyectos técnicos y de análisis más allá de los aspectos básicos de mantenimiento del equipamiento.

Se ha identificado la relevancia de transmitir a los responsables de otras áreas asistenciales cómo la información proveniente del mantenimiento del equipamiento electromédico es una fuente estratégica de datos que ayuda a la toma de decisiones y que puede actuar sinérgicamente con los procesos propios de cada área.

Estos resultados son de gran utilidad para los gestores y diferentes responsables de los hospitales, ya que aumenta la eficiencia del sistema a través de la optimización de los recursos humanos, materiales y financieros. Se alinean mejor las necesidades del hospital con los medios actuales y se ayuda al dimensionamiento óptimo de recursos futuros a través de la adecuación tecnológica, reducción de costes y mejor información para inversiones o renovación.

5.2 Conclusiones específicas

Se ha comprobado que los equipos de alta tecnología tienen un impacto muy relevante en el apartado de inversión de los hospitales debido al desembolso tan elevado que hay que realizar para su adquisición. Es por ello que la explotación de estos equipos debe optimizarse para que la amortización sea lo más rápida posible, generando ingresos que puedan destinarse a otras partidas. Por lo tanto, el departamento de diagnóstico por imagen debe intentar que sus procedimientos no tengan ineficiencias con el fin de realizar más pruebas en un mismo periodo de tiempo, aumentar la satisfacción de paciente y liberar recursos para que puedan ser usados en otros servicios.

Los resultados del estudio de optimización del proceso de un equipo de alta tecnología muestran que es posible actuar sobre varias dimensiones para la mejora del funcionamiento del servicio. Según las soluciones propuestas se ha estimado una reducción del tiempo medio de realización de pruebas equivalente a un ahorro de 160.000 € anuales. Se plantean mejoras en la calidad del servicio, añadiendo nuevo valor al proceso, aumentando la satisfacción del paciente y optimizando los métodos de trabajo de los recursos asistenciales que forman parte de él. Tras la implantación de varias de las soluciones propuestas se demuestra que las medidas son efectivas y que están cumpliendo con los objetivos esperados tanto en el plano económico como en el de mejora de calidad asistencial al paciente y para el trabajador.

Con el anterior resultado se ha cumplido con el objetivo específico de optimizar un proceso de equipamiento de alta tecnología mediante la aplicación de metodología *Lean*. Asimismo, se ha logrado el objetivo complementario de reducción de costes en un proceso y mejora de la calidad del servicio.

Por otro lado, en la mayoría de los hospitales existen departamentos especializados en la gestión de compras, mantenimiento, ingeniería, recursos humanos, contabilidad, etc. cuya actividad se desarrolla de forma relativamente independiente a la actividad asistencial. Cada área tiene sus propios procesos y no suelen diseñarse de una forma integrada, lo cual no quiere decir que no funcionen de forma interrelacionada, sino que muchas veces estas relaciones permanecen ocultas.

Se ha demostrado que la información de mantenimiento del equipamiento electromédico en la dimensión de coste, número de incidencias y tiempo de resolución resulta altamente correlacionada con la de recursos e infraestructura del centro. Conociendo información básica del edificio como superficie, número de camas y quirófanos o valor de compra de los equipos es posible estimar los costes de mantenimiento de cada centro, así como el número de incidencias anuales esperadas. Por otro lado, también ha sido posible obtener estimaciones de mantenimiento a través de datos asistenciales o número de actos médicos como el

número de ingresos y cirugías o tiempo de estancia hospitalaria. El uso adecuado de la información de mantenimiento permite un correcto dimensionamiento y capacitación de los recursos técnicos y la posibilidad de aplicar protocolos eficaces para realizar las reparaciones de forma óptima. Esto permite que el número de incidencias correctivas se minimicen o al menos lo hagan sus consecuencias y gravedad.

Los resultados indican que se ha alcanzado el objetivo específico de análisis de las relaciones entre las variables de mantenimiento con otras de tipo hospitalario a través de las correlaciones entre los datos de las incidencias y otras variables de infraestructura y actos médicos. De forma complementaria se han logrado los objetivos planteados de ayuda a la toma de decisiones del área de ingeniería y otros departamentos y la obtención de información relevante para el diseño de nuevos centros hospitalarios.

Por último, la operativa de mantenimiento genera una actividad transversal a todos los departamentos asistenciales o de apoyo que da lugar a una gran cantidad de información técnica y de uso de los equipos. La mayor parte de estos datos se refieren a aspectos técnicos del dispositivo, descripción de la incidencia y solución aportada. Sin embargo, al combinar adecuadamente la información particular de cada reparación y extenderla a familias de equipos completos se pueden obtener conclusiones sobre desempeño, obsolescencia, costes, planes de renovación, malos usos, robustez de equipos, averías recurrentes, baja calidad, adecuación de contratos, etc. que van más allá del departamento técnico.

Se ha comprobado a través del análisis de la información de las incidencias preventivas y correctivas, extraídas del software de gestión de mantenimiento de hospitales, que es posible identificar familias y tipos de equipos que tienen altos niveles de obsolescencia, baja calidad de servicio, alcances incorrectos del contrato o en general un mantenimiento inadecuado. Esta información resulta de gran valor para la toma de decisiones en diferentes departamentos, ya que además de ayudar a corregir problemas inmediatos permite establecer estrategias a largo plazo de compras, acuerdos o selección de nivel tecnológico. La mejora del mantenimiento en una empresa se considera una inversión con un impacto positivo en la calidad y en la disponibilidad del producto, así como en la productividad de la organización.

Se ha logrado el objetivo específico de análisis de los datos de mantenimiento del equipamiento electromédico para la ayuda a la toma de decisiones estratégicas y de largo plazo. Este análisis cumple con todos los objetivos complementarios planteados en esta Tesis Doctoral: ahorro de costes, mejora de la calidad del servicio, ayuda a la toma de decisiones de diferentes áreas y obtención de información para diseño de nuevos centros.

5.3 Líneas futuras de trabajo

Trabajos futuros más allá de esta investigación y sus resultados pueden centrarse en hacer extensivo el uso de la metodología *Lean* a otros procesos relevantes del hospital. Es habitual que en los departamentos de mayor complejidad y presión como la urgencia, quirófano y unidades de cuidados intensivos surjan ineficiencias.

Otra de las líneas a desarrollar, para dar continuidad a este trabajo, es la implantación de un *software* de *Bussiness Inteligence* que permita compartir de forma inmediata la información de mantenimiento, informes, indicadores, análisis a otras áreas como compras, contabilidad, finanzas, etc.

Por último, se plantea extender este trabajo a hospitales de otros países aportando el valor y conocimiento adquirido en esta investigación, incorporando sus características específicas.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] F. Becker, "Hospital facilities and the role of evidence-based design," *Journal of Facilities Management*, vol. 5, no. 4, pp. 263–274, 2007.

[2] A. Miguel Cruz and M. R. Guarín, "Determinants in the number of staff in hospitals' maintenance departments: A multivariate regression analysis approach," *Journal of Medical Engineering and Technology*, vol. 41, no. 2, pp. 151–164, 2017.

[3] M. I. Waly, "Evaluation of clinical engineering department services in Riyadh city hospitals," *International Journal of Online and Biomedical Engineering*, vol. 16, no. 11, 2020.

[4] A. M. Cruz and G. Haugan, "Determinants of maintenance performance: A resource-based view and agency theory approach," *Journal of Engineering and Technology*, vol. 51, pp. 33–47, 2019.

[5] Z. Yousefli, F. Nasiri, and O. Moselhi, "Healthcare facilities maintenance management: a literature review," *Journal of Facilities Management*, vol. 15(4), pp. 352–375, 2017.

[6] A. M. Cruz, A. M. Rios Rincón, and G. Haugen, "Measuring the performance of maintenance service outsourcing," *Biomedical Instrumentation and Technology*, vol. 47, no. 6, pp. 524–535, 2013.

[7] A. M. Cruz, G. Haugan, and A. Rios Rincón, "Outsourcing versus in-house maintenance of medical devices: a longitudinal, empirical study," *Revista Panamericana de Salud Pública*, 2014.

[8] J. Aunión-Villa, M. Gómez-Chaparro, and J. G. Sanz-Calcedo, "Study of the energy intensity by built areas in a medium-sized Spanish hospital," *Energy Efficiency*, vol. 14 (3), no. 26, 2021.

[9] J. Božić, P. Ilić, and S. Ilić, "Indoor air quality in the hospital: the influence of heating, ventilating and conditioning systems," *Brazilian Archives of Biology and Technology*, vol. 62, 2019.

[10] A. A. Nasiripour and R. A. Jadidi, "Designing a model of medical equipment management for Iranian hospitals," *Arak University of Medical Science Journal*, vol. 11, no. 1(42), pp. 97–108, 2008.

[11] M. C. Chyu *et al.*, "Healthcare engineering defined: A white paper," *Journal of Healthcare Engineering*, vol. 6, pp. 635–648, 2015.

[12] M. Pavel *et al.*, "The role of technology and engineering models in transforming healthcare," *Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 6, pp. 156–177, 2013.

[13] Y. Fältholm and A. Jansson, "The implementation of process orientation at a Swedish hospital," *International Journal of Health Planning and Management*, vol. 23, no. 3, pp. 219–233, 2008.

[14] G. Antonacci, J. E. Reed, L. Lennox, and J. Barlow, "The use of process mapping in healthcare quality improvement projects," *Health Services Management Research*, vol. 31, no. 2, pp. 74–84, 2018.

[15] A. González, J. García-Sanz-Calcedo, and D. Rodríguez-Salgado, "A quantitative analysis of final energy consumption in hospitals in Spain," *Sustainable cities and society*, vol. 36, pp. 169–175, 2018.

[16] P. Gemmel, D. Vandaele, and W. Tambeur, "Hospital Process Orientation (HPO): The development of a measurement tool," *Total Quality Management and Business Excellence*, vol. 19, no. 12, pp. 1207–1217, 2008.

[17] N. Janićijević, "Organizational models as configurations of structure, culture, leadership, control, and change strategy," *Economic Annals*, vol. 62, no. 213, pp. 67–91, 2017.

[18] J. A. Cogin, J. L. Ng, and I. Lee, "Controlling healthcare professionals: How human resource management influences job attitudes and operational efficiency," *Human Resources for Health*, vol. 14, no. 1, pp. 1–8, 2016.

[19] B. Münstermann and T. Weitzel, "What is process standardization?," *CONF-IRM 2008 Proceedings*, vol. 64, 2008.

[20] N. Nissinboim and E. Naveh, "Process standardization and error reduction: A revisit from a choice approach," *Safety Science*, vol. 103, pp. 43–50, 2018.

[21] P. Qiu, "Some perspectives on nonparametric statistical process control," *Journal of Quality Technology*, vol. 50, no. 1, pp. 49–65, 2018.

[22] D. Ringrose, "Development of an organizational excellence framework," *TQM Journal*, vol. 25, no. 4, pp. 441–452, 2013.

[23] A. M. Campbell, D. E. Lighter, and B. U. Mueller, "Creation of Quality Management Systems: Frameworks for Performance Excellence," in *Patient Safety and Quality Improvement in Healthcare*, Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 37–53.

[24] H. Mintzberg, *Mintzberg on management: Inside our strange world*. New York: Free Press, 1989.

[25] J. U. Stoelwinder, "The relationship between organisation structure and management control in hospitals: An elaboration and bureaucracy model," *Accounting, Auditing & Accountability Journal*, vol. 3, no. 3, pp. 18–33, 1990.

[26] K. Nyland and I. J. Pettersen, "The control gap: The role of budgets, accounting information and (non-) decisions in hospital settings," *Financial Accountability and Management*, vol. 20, no. 1, pp. 77–102, 2004.

[27] M. T. Taner, B. Sezen, and K. M. Atwat, "Application of Six Sigma methodology to a diagnostic imaging process," *International Journal of Health Care Quality Assurance*, vol. 25, no. 4, pp. 274–290, 2012.

[28] M. D. C. Caccia-Bava, T. Guimaraes, and S. J. Harrington, "Hospital organization culture, capacity to innovate and success in technology adoption," *Journal of Health, Organisation and Management*, vol. 20, no. 3, pp. 194–217, 2006.

[29] T. Yousefinezhadi, E. Mohamadi, H. S. Palangi, and A. A. Sari, "The effect of ISO 9001 and the EFQM model on improving hospital performance: A systematic review," *Iranian Red Crescent Medical Journal*, vol. 17, no. 12, p. 23010, 2015.

[30] R. Colombi, G. Martini, and G. Vittadini, "Determinants of transient and persistent hospital efficiency: The case of Italy," *Health Economics*, vol. 26, pp. 5–22, 2017.

[31] N. L. McKay and M. E. Deily, "Cost inefficiency and hospital health outcomes," *Health Economics*, vol. 17, no. 7, pp. 833–848, 2008.

[32] J. González-Domínguez, G. Sánchez-Barroso, J. Aunión-Villa, and J. Garcia-Sanz-Calcedo, "Markov model of computed tomography equipment," *Engineering Failure Analysis*, vol. 127, 2021.

[33] H. Liao, M. Tang, Z. Li, and B. Lev, "Bibliometric analysis for highly cited papers in operations research and management science from 2008 to 2017 based on essential science indicators," *Omega*, vol. 88, pp. 223–236, 2019.

[34] A. S. Safaei, F. Heidarpoor, and M. M. Paydar, "A novel mathematical model for group purchasing in healthcare," *Operations Research for Health Care*, vol. 15, pp. 82–90, 2017.

[35] J. Van Den Heuvel, L. Koning, A. J. J. C. Bogers, M. Berg, and M. E. M. Van Dijen, "An ISO 9001 quality management system in a hospital: Bureaucracy or just benefits?," *International Journal of Health Care Quality Assurance*, vol. 18, no. 5, pp. 361–369, 2005.

[36] C. J. Corbett, M. J. Montes-Sancho, and D. A. Kirsch, "The financial impact of ISO 9000 certification in the United States: An empirical analysis," *Management Science*, vol. 51, no. 7, pp. 1046–1059, 2005.

[37] Z. Zhu and L. Scheuermann, "A comparison of quality programmes: Total quality management and ISO 9000," *Total Quality Management*, vol. 10, no. 2, pp. 291–297, 1999.

[38] S. Nickel and U.-A. Schmidt, "Process improvement in hospitals," *Quality Management in Health Care*, vol. 18, no. 4, pp. 326–338, 2009.

[39] P. Bhattacharjee and P. K. Ray, "Patient flow modelling and performance analysis of healthcare delivery processes in hospitals: A review and reflections," *Computers and Industrial Engineering*, vol. 78, pp. 299–312, 2014.

[40] E. N. Weiss, M. A. Cohen, and J. C. Hershey, "Iterative estimation and validation procedure for specification of semi-markov models with application to patient flow," *Operations Research*, vol. 30, no. 6, pp. 1082–1104, 1970.

[41] J. R. Broyles, J. K. Cochran, and D. C. Montgomery, "A statistical Markov chain approximation of transient hospital inpatient inventory," *European Journal of Operational Research*, vol. 207, no. 3, pp. 1645–1657, 2010.

[42] A. D'Andreamatteo, L. Ianni, F. Lega, and M. Sargiacomo, "Lean in healthcare: A comprehensive review," *Health Policy*, vol. 119, no. 9, pp. 1197–1209, 2015.

[43] T. Melton, "The benefits of Lean Manufacturing: What Lean thinking has to offer the process industries," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 83, no. 6, pp. 662–673, 2005.

[44] M. Soliman, *Jidoka: The Toyota Principle of Building Quality into the Process*. Zenodo, 2020.

[45] H. Dos, R. Leite, and G. E. Vieira, "Lean philosophy and its applications in the service industry: a review of the current knowledge," *Production*, vol. 25, no. 3, pp. 529–541, 2015.

[46] L. B. de Souza, "Trends and approaches in lean healthcare," *Leadership in Health Services*, vol. 22, no. 2, pp. 121–139, 2009.

[47] V. C. Machado and U. Leitner, "Lean tools and lean transformation process in health care," *International Journal of Management Science and Engineering Management*, vol. 5, no. 5, pp. 383–392, 2010.

[48] J. Aherne and J. Whelton, *Applying lean in healthcare: a collection of international case studies*. CRC Press, 2010.

[49] J. B. Kruskal, A. Reedy, L. Pascal, M. P. Rosen, and P. M. Boiselle, "Quality initiatives: Lean approach to improving performance and efficiency in a radiology department," *Radiographics*, vol. 32, no. 2, pp. 573–587, 2012.

[50] J. Karstoft and L. Tarp, "Is Lean Management implementable in a

department of radiology?," *Insights into Imaging*, vol. 2, pp. 267–273, 2011.

[51] L. B. M. Costa and M. Godinho-Filho, "Lean healthcare: review, classification and analysis of literature," *Production Planning and Control*, vol. 27, no. 10, pp. 823–836, 2016.

[52] M. Hossain, A. Hamid, M. Islam, and M. Ahmad, "Clinical Engineering: It's necessity present status and future trends in Bangladesh. A case study," *International Journal of Technology Enhancements and Emerging Engineering Research*, vol. 4(6), pp. 1–5, 2016.

[53] G. Vacchiano and G. Vyshka, "The use of medical devices in Italy and Europe: The need of a careful control policy," *Int J Med Biotechnol Genetics*, vol. 3(2), pp. 21–26, 2015.

[54] J. I. Roig, A. Gómez, I. Romero, and M. C. Carnero, "Maintenance policies optimization of medical equipment in a health care organization," Encyclopedia of Information Science and Technology, Fourth Edition, 2019, pp. 143–157.

[55] N. Leitgeb, "Electromedical devices," in *Safety of electromedical devices*, Vienna: Springer, 2010, pp. 143–161.

[56] S. Maruvada, "Overview of International Electrotechnical Commission Technical Committee 87 ultrasound organization and standards," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 141, no. 5, pp. 4006–4006, 2017.

[57] N. A. A. Rani, M. R. Baharum, A. R. N. Akbar, and A. H. Nawawi, "Perception of maintenance management strategy on healthcare facilities," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 170, pp. 272–281, 2015.

[58] J. Aunión-Villa, M. Gómez-Chaparro, and J. Garcia-Sanz-Calcedo, "Assessment of the maintenance costs of electro-medical equipment in Spanish hospitals," *Expert Review of Medical Devices*, 2020.

[59] A. A. Okunade and A. R. Osmani, "Technology, productivity, and costs in healthcare," in *Oxford Research Encyclopedia of Economics and Finance*, Oxford University Press, 2018.

[60] Cohen T., "The cost of biomedical equipment repair and maintenance: results of a survey," *Medical Instrumetation*, vol. 16, no. 5, pp. 269–71, 1982.

[61] M. D. Rosko, "Cost efficiency of US hospitals: A stochastic frontier approach," *Health Economics*, vol. 10, no. 6, pp. 539–551, 2001.

[62] F. McGain and C. Naylor, "Environmental sustainability in hospitals – a systematic review and research agenda," *Journal of Health Services Research and Policy*, vol. 19, no. 4, pp. 245–252, 2014.

[63] C. D. Jepson and R. Page, "The role of quality assurance certification in

obtaining the CE mark for electromedical equipment," *IEE Colloquium on Medical Devices Directive - Digest of Papers*, vol. 323, no. 2, pp. 1–8, 1997.

[64] N. Mendes and F. Coutinho, "Maintenance of electromedicine equipment: A case study based on outsourcing," *6th Portuguese Meeting on Bioengineering*, pp. 1–4, 2019.

[65] E. Özdemirci and M. Yatak, "Reliability assessments of infant incubator and the analyzer," *Gazi University Journal of science*, vol. 27(4), pp. 1169–1175, 2014.

[66] P. Daneri, *Electromedicina: equipos de diagnóstico y cuidados intensivos*. Buenos Aires: HASA, 2007.

[67] M. Herrera-Galán and S. Natasha-Walker, "Procedure to evaluate and control efficiently the operations management of medical equipment in the maintenance unit of a health institution," *Ingeniería, investigación y tecnología*, vol. 19, no. 1, pp. 1–10, 2018.

[68] F. Badilla-Murillo, B. Vargas-Vargas, O. Víquez-Acuña, and J. Garcia-Sanz-Calcedo, "Analysis of the installed capacity in a medical angiography room through Discrete Event Simulation," *Processes*, vol. 8, no. 6, p. 660, 2020.

[69] M. J. Picazo-Rodenas, "Mejora del sistema de mantenimiento de los equipos de electromedicina mediante la aplicación de la metodología RCM2," Thesis. Universitat Politècnica de València, 2011.

[70] J. Santana and R. Santiago, "Extended warranty of medical equipment subject to imperfect repairs: an approach based on generalized renewal process and Stackelberg game," *Maintenance and Reliability*, vol. 20(4), pp. 567–578, 2018.

[71] P. Escobar, M. Fresno, and J. M. Massa, "XML Markup for maintenance management of critical care medical devices," *VI Congreso Argentino de Informática y Salud (CAIS)-JAIIO 44*, pp. 158–165, 2015.

[72] H. Mahfoud, A. El-Barkany, and A. El-Biyaali, "Medical maintenance performance monitoring: A roadmap to efficient improvement," *International Journal of Productivity and Quality Management*, vol. 22(1), pp. 117–140, 2017.

[73] V. Gonnelli, F. Frosini, and F. Satta, "Evidence-based approach to medical equipment maintenance monitoring," *European Medical and Biological Engineering Conference*, vol. 65, pp. 258–261, 2018.

[74] A. González-González, J. García-Sanz-Calcedo, and D. R. Salgado, "Evaluation of energy consumption in German hospitals: Benchmarking in the public sector," *Energies*, vol. 11, no. 9, p. 2279, 2018.

[75] J. García-Sanz-Calcedo and T. Y. Awf Al-Kassir, "Economic and

Environmental Impact of Energy Saving in Healthcare Buildings," *Applied Sciences*, vol. 8, no. 3, p. 440, 2018.

[76] A. Macías-García, J. García-Sanz-Calcedo, J. P. Carrasco-Amador, and R. Segura-Cruz, "Adsorption of paracetamol in hospital wastewater through activated carbon filters," *Sustainability*, vol. 11, p. 2672, 2019.

[77] V. Umbelino, F. Coutinho, and I. Fonseca, "Standards about Medical Equipment Maintenance–A Survey," *6th Portuguese Meeting on Bioengineering (ENBENG)*, pp. 1–4, 2019.

[78] J. R. C. Coelho, "Técnicas de manutenção em electromedicina: estágio no SUCH," Thesis. IPC - Instituto Politécnico de Coimbra, 2017.

[79] W. Murillo and M. Cortés, "Characterization of the maintenance management of biomedical equipment in emergency services in clinics and hospitals in Medellin period 2008-2009," *Ciencias de la salud*, vol. 11(1), pp. 35–44, 2013.

[80] W. Orozco and G. Narváez, "Maintenance management in biomedical equipments in the context of the research project cleaner production in the health cluster of Medellín, Colombia," *Revista Ingeniería Biomédica*, vol. 9(18), pp. 15–19, 2015.

[81] B. Mwanza and C. Mbohwa, "An assessment of the effectiveness of equipment maintenance practices in public hospitals," *Procedia Manufacturing*, vol. 4, pp. 307–314, 2015.

[82] J. Spetz and L. S. Maiuro, "Measuring levels of technology in hospitals," *The Quarterly Review of Economics and Finance*, vol. 44, no. 3, pp. 430–447, 2004.

[83] M. Gómez-Chaparro, J. García-Sanz-Calcedo, and J. Aunión-Villa, "Maintenance in hospitals with less than 200 beds: efficiency indicators," *Building Research and Information*, vol. 48, no. 5, pp. 526–537, 2020.

[84] E. Martinez de Salazar and J. García-Sanz-Calcedo, "Study on the influence of maintenance operations on energy consumption and emissions in healthcare centres by fuzzy cognitive maps," *Journal of Building Performance Simulation*, vol. 12(4), pp. 420–432, 2019.

[85] A. Fernández-Abásolo, "New measure of hospital maintenance: Balanced Scorecard," *Journal of Health Management*, vol. 8, no. 1, pp. 139–143, 2006.

[86] S. AlDossary, M. G. Martin-Khan, N. K. Bradford, and A. C. Smith, "A systematic review of the methodologies used to evaluate telemedicine service initiatives in hospital facilities," *International Journal of Medical Informatics*, vol. 97, pp. 171–194, 2017.

[87] S. Capolongo *et al.*, "Monographic section social sustainability in healthcare facilities: a rating tool for analysing and improving social aspects in

environments of care," *Ann Ist Super Sanità*, vol. 52, no. 1, pp. 15–23, 2016.

[88] V. Thakur and R. Anbanandam, "Healthcare waste management: an interpretive structural modeling approach," *International Journal of Health Care Quality Assurance*, vol. 29, no. 5, pp. 559–581, 2016.

[89] R. A. Grifa and G. Pozzoli, "Electro-medical devices: Environmental regulation on hazardous substances," *Microchemical Journal*, vol. 148, pp. 568–572, 2019.

[90] N. Saleh, A. Sharawi, M. A. Elwahed, A. Petti, D. Puppato, and G. Balestra, "A new approach for preventive maintenance prioritization of medical equipment," in *XIII Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing 2013. IFMBE Proceedings*, 2014, vol. 41, pp. 1059–1062.

[91] J. González-Domínguez, G. Sánchez-Barroso, and J García-Sanz-Calcedo, "Scheduling of preventive maintenance in healthcare buildings using Markov chain," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 15, p. 5263, 2020.

[92] L. Deprez, K. Antonio, and R. Boute, "Pricing service maintenance contracts using predictive analytics," *European Journal of Operational Research*, vol. 290, no. 2, pp. 530–545, 2021.

[93] J. M. Simões, C. F. Gomes, and M. M. Yasin, "Changing role of maintenance in business organisations: Measurement versus strategic orientation," *International Journal of Production Research*, vol. 54, no. 11, pp. 3329–3346, 2016.

[94] R. Gitzel, S. Subbiah, and C. Ganz, "A data quality dashboard for CMMS data," *Icores*, 2018.

[95] F. Medina-Arteaga and J. Ruiz-Pernett, "Diseño de un sistema de gestión de mantenimiento asistido por ordenador (GMAO) como herramienta web para gestionar solicitudes de mantenimiento y la toma de decisiones en la división de apoyo logístico de la Universidad de Córdoba," Thesis. Facultad de Ingeniería. Universidad Córdoba, 2014.

[96] K. Mahlamäki and M. Nieminen, "Analysis of manual data collection in maintenance context," *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 26, no. 1, pp. 104–119, 2019.

[97] I. Kullolli, "Clinical engineering management: Selecting a computerized maintenance management system check points," *Biomedical Instrumentation & Technology*, vol. 42, no. 4, pp. 276–278, 2008.

[98] M. Dachyar, Z. J. Azra, and M. Dachyar, "The maintenance process improvement of radiological health equipment, by utilizing Internet of Things (IoT)," *International Journal of Advanced Science and Technology*, vol. 29, no. 7s, pp. 3705–3714, 2020.

[99] A. W. Labib, "A decision analysis model for maintenance policy selection using a CMMS," *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 191–202, 2004.

[100] F. Gonzalez Aleu, E. M. Van Aken, and H. Keathley-Herring, "Bibliometric analysis of research design characteristics in continuous improvement projects in hospitals," 2017.

[101] D. Yaduvanshi and A. Sharma, "Lean Six Sigma in health operations: Challenges and opportunities - 'Nirvana for Operational Efficiency in Hospitals in a Resource Limited Settings,'" *Journal of Health Management*, vol. 19, no. 2, pp. 203–213, 2017.

[102] J. Maley, C. Kowalkowski, S. Brege, and S. Biggemann, "Outsourcing maintenance in complex process industries: Managing firm capabilities in lock-in effect," *Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics*, vol. 27, no. 5, pp. 801–825, 2015.

[103] E. Doval, "Is outsourcing a strategic tool to enhance the competitive advantage?," *Review of General Management*, no. 23 (1), pp. 78–87, 2016.

[104] A. Cleven, T. Mettler, P. Rohner, and R. Winter, "Healthcare quality innovation and performance through process orientation: Evidence from general hospitals in Switzerland," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 113, pp. 386–395, 2016.

[105] G. M. Glazer and J. A. Ruiz-Wibbelsmann, "The invisible radiologist," *Radiology*, vol. 258, no. 1, pp. 18–22, 2011.

[106] I. Bulakh, M. Didichenko, O. Kozakova, and O. Chala, "Sustainable futures in the context of architectural design of hospitals," in *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 166, p. 08001.

[107] J. García-Sanz-Calcedo, N. Nuno-de-Sousa, and J. P. Almeida-Fernandes, "Measurement of embodied carbon and energy of HVAC facilities in healthcare centers," *Journal of Cleaner Production*, vol. 289, p. 125151, 2021.

[108] J. García-Sanz-Calcedo, N.-S. Neves, and J. P. Almeida-Fernandes, "Study of embodied energy in healthcare center construction," *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 27, no. 4, pp. 260–267, 2021.

[109] G. Sanchez-Barroso and J. García-Sanz-Calcedo, "Evaluation of HVAC design parameters in high-performance hospital operating theatres," *Sustainability*, vol. 11, p. 1493, 2019.

[110] M. Gómez-Chaparro, J. García-Sanz-Calcedo, and L. Armenta-Márquez, "Analytical determination of medical gas consumption and their impact on hospital sustainability," *Sustainability*, vol. 10, no. 8, p. 2948, 2018.

[111] P. W. Handayani, A. N. Hidayanto, and I. Budi, "User acceptance factors

of hospital information systems and related technologies: Systematic review," *Informatics for Health and Social Care*, vol. 43, no. 4, pp. 401–426, 2018.

[112] L. Yuzhen, "The discussion of the quality and standard for the outsourcing washing of bedding and clothing in Hospitals," *Hospital Modern Management*, 2011.

[113] M. J. Osborne, "A resolution to the NPV-IRR debate?," *Quarterly Review of Economics and Finance*, vol. 50, no. 2, pp. 234–239, 2010.

[114] Z. Lei, "Study on energy consumption status and energy-saving strategy of hospital building: A case study of a Hospital," *Science and Technology*, vol. 25, p. 17, 2015.

[115] M. Ungan, "Towards a better understanding of process documentation," *TQM Magazine*, vol. 18, no. 4, pp. 400–409, 2006.

[116] G. Schueller *et al.*, "The key role of the radiologist in the management of polytrauma patients: indications for MDCT imaging in emergency radiology," *Radiologia Medica*, vol. 120, no. 7, pp. 641–654, 2015.

[117] F. C. Lunenburg, "Organizational structure: Mintzberg's framework," *International Journal of Scholarly*, vol. 14, no. 1, 2012.

[118] R. T. Domingo, "How non-value added work affects the productivity of healthcare professionals," *Management in Healthcare*, vol. 5, no. 1, pp. 29–44, 2020.

[119] C. Giannantonio and A. Hurley-Hanson, "Frederick Winslow Taylor: Reflections on the relevance of the principles of scientific management 100 years later," *Journal of Business and management*, vol. 17, no. 1, pp. 7–10, 2011.

[120] J. Antony, R. Hoerl, and R. Snee, "An Overview of Lean Six Sigma*," in *Lean Six Sigma in Higher Education*, Emerald Publishing Limited, 2020, pp. 1–11.

[121] T. Ohno, "How the Toyota Production System was created," *Japanese Economic Studies*, vol. 10, no. 4, pp. 83–101, 1982.

[122] A. . Toledano-de-Diego, N. . Mañes-Sierra, and S. J. García, "Las claves del éxito de Toyota. Lean, más que un conjunto de herramientas y técnicas," *Cuadernos de Gestión*, vol. 9, no. 2, pp. 111–122, 2009.

[123] J. P. Womack and D. T. Jones, "Lean thinking−banish waste and create wealth in your corporation," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 48, no. 11. p. 1148, 1997.

[124] M. Espejo-Alarcón and J. Moyano-Fuentes, "Lean Production: estado actual y desafíos futuros de la investigación," *Investigaciones Europeas de*

Dirección y Economía de la Empresa, vol. 13, no. 2, pp. 179–202, 2007.

[125] E. Andrés-López, I. González-Requena, and A. Sanz-Lobera, "Lean service: Reassessment of Lean Manufacturing for service activities," in *Procedia Engineering*, Jan. 2015, vol. 132, pp. 23–30.

[126] A. A. Armenakis and A. G. Bedeian, "Organizational change: A review of theory and research in the 1990s," *Journal of Management*, vol. 25, no. 3, pp. 293–315, 1999.

[127] A. A. Armenakis and S. G. Harris, "Reflections: Our journey in organizational change research and practice," *Journal of Change Management*, vol. 9, no. 2, pp. 127–142, 2009.

[128] D. I. Sessler, "Implications of practice variability," *Anesthesiology*, vol. 132, pp. 606–614, 2020.

[129] H. McLaughlin, "What's in a Name: 'Client', 'Patient', 'Customer', 'Consumer', 'Expert by Experience', 'Service User', What's Next?," *British Journal of Social Work*, vol. 39, no. 6, pp. 1101–1117, 2009.

[130] N. M. Saad, A. Al-Ashaab, E. Shehab, and M. Maksimovic, "A3 thinking approach to support problem solving in Lean product and process development," in *Advanced Concurrent Engineering*, 2013, pp. 871–882.

[131] T. Pyzdek, "A3 Thinking," in *The Lean Healthcare Handbook*, 2nd ed., Springer, 2021, pp. 223–243.

[132] C. N. Johnson, "The benefits of PDCA," *Quality Progress*, vol. 35, no. 5, p. 120, 2002.

[133] J. Dalton, "Gemba walks," in *Great Big Agile*, Apress, 2019, pp. 173–174.

[134] M. A. Rehab and M. D. Ahmed, "Dynamic lean assessment for takt time implementation," *Procedia CIRP*, vol. 17, pp. 577–581, 2014.

[135] D. Romero, P. Gaiardelli, T. Wuest, D. Powell, and M. Thürer, "New forms of gemba walks and their digital tools in the digital Lean Manufacturing world," in *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, vol. 592 IFIP, Springer, 2020, pp. 432–440.

[136] J. Lovelle, "Mapping the value stream," *IIE Solutions*, vol. 33, no. 3, pp. 26–27, 2001.

[137] P. Hines and N. Rich, "The seven value stream mapping tools," *International Journal of Operations and Production Management*, vol. 17, no. 1. pp. 46–64, 1997.

[138] J. Drupsteen, T. van der Vaart, and D. P. van Donk, "Integrative practices in hospitals and their impact on patient flow," *International Journal of Operations and Production Management*, vol. 33, no. 7, pp. 912–933, 2013.

[139] M. Fang, J. Ma, and Z. Cao, "The architectural design of natural light in hospital buildings," in *2011 International Conference on Electric Technology and Civil Engineering, ICETCE 2011 - Proceedings*, 2011, pp. 6953–6956.

[140] G. Sánchez-Barroso, M. Botejara-Antúnez, J. García-Sanz-Calcedo, and F. Zamora-Polo, "A fife cycle analysis of ionizing radiation shielding construction systems in healthcare buildings," *Journal of Building Engineering*, vol. 41, p. 102387, 2021.

[141] N. N. Maizlin and S. Somers, "The role of clinical history collected by diagnostic imaging staff in interpreting of imaging examinations," *Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences*, vol. 50, no. 1, pp. 31–35, 2019.

[142] P. Ford, "The role of support workers in the department of diagnostic imaging - Service managers perspectives," *Radiography*, vol. 10, no. 4, pp. 259–267, 2004.

[143] K. Doi, "Diagnostic imaging over the last 50 years: research and development in medical imaging science and technology," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 51, no. 13, pp. 5–27, 2006.

[144] K. Antosz, D. Stadnicka, and R. M. C. Ratnayake, "Use of lean management philosophy in health sector: A VSM based case study," in *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, Dec. 2016, vol. 2016-Decem, pp. 1523–1528.

[145] K. J. Edwards, K. Walker, and J. Duff, "Instruments to measure the inpatient hospital experience: A literature review," *Patient Experience Journal*, vol. 2, no. 2, pp. 77–85, 2015.

[146] K. E. Keenan, Z. Gimbutas, A. Dienstfrey, and K. F. Stupic, "Assessing effects of scanner upgrades for clinical studies," *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, vol. 50, no. 6, pp. 1948–1954, 2019.

[147] M. Alexander, "Managing patient stress in pediatric radiology," *Radiologic Technology*, vol. 83, no. 6, pp. 549–560, 2012.

[148] J. García-Sanz-Calcedo and M. Gómez-Chaparro, "Quantitative analysis of the impact of maintenance management on the energy consumption of a hospital in Extremadura (Spain)," *Sustainable cities and society*, vol. 30, pp. 217–222, 2017.

[149] M. A. Hossain *et al.*, "Necessity of clinical engineers to improve present health technology management in developing countries," *Modern Applied Science*, vol. 9, no. 12, p. 220, 2015.

[150] J. N. Amoore, D. G. Stay, and J. Mather, "Scheduled inspection of electromedical equipment. Planning and assessment," *Journal of Medical Engineering and Technology*, vol. 19, no. 6, pp. 211–218, 1995.

[151] M. Stroili, E. Pavan, M. Gorela, and F. Kenda, "System for the management of the continuity of use of medical devices in hospitals," *Journal of Electrical Engineering*, vol. 4, pp. 34–41, 2016.

[152] C. P. Childers and M. Maggard-Gibbons, "Understanding costs of care in the operating room," *JAMA Surgery*, vol. 153, no. 4, p. 176233, 2018.

[153] J. Innis, J. Barnsley, W. Berta, and I. Daniel, "Do hospital size, location, and teaching status matter? Role of context in the use of evidence-based discharge practices," *International Journal of Healthcare Management*, 2020.

[154] S. Cinaroglu, "Changes in hospital efficiency and size: An integrated propensity score matching with data envelopment analysis," *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 76, p. 100960, 2020.

[155] S. Zhu, W. Fan, S. Yang, J. Pei, and P. M. Pardalos, "Operating room planning and surgical case scheduling: a review of literature," *Journal of Combinatorial Optimization*, vol. 37, no. 3, pp. 757–805, 2019.

[156] N. Bobrovitz, I. Onakpoya, N. Roberts, C. Heneghan, and K. R. Mahtani, "Protocol for an overview of systematic reviews of interventions to reduce unscheduled hospital admissions among adults," *BMJ Open*, vol. 5, no. 8, p. 8269, 2015.

[157] M. Cifrek, "Inspection and testing of electroencephalographs, electromyographs, and evoked response equipment," in *Inspection of Medical Devices. Springer*, 2018, pp. 141–157.

[158] H. Alzaben, C. McCollin, and L. Eugene, "Maintenance planning in a Saudi Arabian hospital," *Safety and Reliability*, vol. 34, no. 2, pp. 25–40, Jun. 2014.

[159] M. Salah, H. Osman, and O. Hosny, "Performance-based reliability-centered maintenance planning for hospital facilities," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 32, no. 1, p. 04017113, Feb. 2018.

7. ANEXOS

I. Artículos publicados en revistas indexadas

I.1 Maintenance in hospitals with less than 200 beds: efficiency indicators

Datos del artículo

Título en español: Mantenimiento en hospitales de menos de 200 camas: indicadores de eficiencia.

Autores: Miguel Gómez Chaparro, Justo García Sanz-Calcedo, Juan Aunión Villa.

Nombre de la revista: Building Research & Information.

ISSN: 0961-3218.

Editorial: Taylor & Francis.

Área temática de la revista: Construction & Building Technology.

Año de publicación: 2020.

DOI: 10.1080/09613218.2019.1678007.

Volumen: 48 (5).

Páginas: 526-537.

Indicios de calidad

Base de Indexación: Journal Citation Report

Edición: Science Citation Index Expanded (SCIE)

Categoría: Construction & Building Technology.

Posición: 12 de 66.

Decil: D2

Cuartil: Q1.

Tercil: T1

Factor de Impacto Journal Citation Report (2020): 5.322

Eigenfactor normalizado: 0.74339

Número de citas en Web of Science: 4.

Número de citas en Scopus: 6.

Número de citas en Scholar: 8.

Número de citas en Researchgate: 8.

Building Research & Information

Routledge
Taylor & Francis Group

ISSN: 0961-3218 (Print) 1466-4321 (Online) Journal homepage: https://www.tandfonline.com/loi/rbri20

Maintenance in hospitals with less than 200 beds: efficiency indicators

Miguel Gómez-Chaparro, Justo García-Sanz-Calcedo & Juan Aunión-Villa

To cite this article: Miguel Gómez-Chaparro, Justo García-Sanz-Calcedo & Juan Aunión-Villa (2019): Maintenance in hospitals with less than 200 beds: efficiency indicators, Building Research & Information, DOI: 10.1080/09613218.2019.1678007

To link to this article: https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1678007

Published online: 17 Oct 2019.

Submit your article to this journal

View related articles

View Crossmark data

Full Terms & Conditions of access and use can be found at
https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=rbri20

BRI BUILDING RESEARCH & INFORMATION
2019
https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1678007

Routledge Taylor & Francis Group

Check for updates

Maintenance in hospitals with less than 200 beds: efficiency indicators

Miguel Gómez-Chaparro[a], Justo García-Sanz-Calcedo [b] and Juan Aunión-Villa[a]

[a]HM Hospitals, Healthcare Engineering, Madrid, Spain; [b]Department of Graphical Expression, Engineering Projects Section, University of Extremadura, Badajoz, Spain

ABSTRACT
The efficiency and sustainability of maintenance is an added value in any building, although critical in hospitals, as it may alter the health of patients and workers. The objective of this paper is to analyse the efficiency of maintenance in hospitals with less than 200 beds. Eight Spanish hospitals with similar construction characteristics and identical maintenance strategies were analysed between 2012 and 2018. The number of maintenance incidents, operation times, costs generated, number of user complaints and other variables were studied and quantified. The results reveal that in hospitals with more than 25,000 annual stays, there are fewer maintenance costs and reports per surface and fewer reports per bed. It was found that hospitals larger than 10,000 m^2 generate lower maintenance costs and fewer reports per useful area and maintenance reports per bed. Moreover, equations to estimate the annual average maintenance costs in hospitals based on its annual number of patient stays and useful floor area were found. A hospital with 164 beds was analysed as a case study. A series of maintenance indicators that allow comparing the efficiency and sustainability of a hospital is proposed, for example, annual maintenance operations and average time spent on preventive and corrective operations.

ARTICLE HISTORY
Received 31 May 2019
Accepted 26 August 2019

KEYWORDS
Maintenance; environmental indicators; building management; building operation

Introduction

Building maintenance has become increasingly important in recent decades due to the continuous sophistication of the facilities and the need to ensure proper operating conditions (Macek & Dobiáš, 2014). Maintenance operations are critical activities in hospitals and are strongly related to the safety of users and workers (Haggard & Hosking, 2003). They also imply high operating costs associated with very intense use (Ciarapica, Giacchetta, & Paciarotti, 2008) and are linked to the overall productivity of the hospital (Carnero & Gómez, 2016).

Since most health facilities operate 24 h a day, it is paramount that the facilities are reliable. They cannot afford 'trial and error' approaches and/or failures in services with patients, as these errors may lead to serious harm or even death (Mwanza & Mbohwa, 2015).

Hospital engineering has acquired crucial importance in the field of hospital management, and its main objective is the efficiency of the building (Chyu et al., 2015) and patient safety (Schaumann, Breslav, Goldstein, Khan, & Kalay, 2017). The added value of having a hospital maintained within sustainable parameters was already demonstrated by Shohet, Lavy, and Bar-On (2003), who found that the performance of hospital buildings depends in no small extent on the efficiency of maintenance execution.

The maintenance of hospitals in Spain is usually carried out through an internal healthcare engineering department, which manages both internal personnel and maintenance contracts with outsourcing companies (Chías & Abad, 2017). Its objective is to guarantee reliability and safety of the technical installations and environmental management of the hospital building.

Yousefli, Nasiri, and Moselhi (2017) reviewed the literature on maintenance management of healthcare facilities and hospital buildings to provide an organized literature review and identify gaps from the perspective of research and practice. They observed that the improving the performance of maintenance functions in healthcare facilities not only leads to cost and resource efficiency gains but also elevates the satisfaction of patients by increasing the quality and reliability of services.

Moreover, Shohet and Lavy (2017) compared the performance and maintenance of hospital facilities and community clinics in Israel; they observed that it is possible to improve the services of healthcare facilities with proper and cost-effective management and maintenance of the facilities. However, these authors did not consider

CONTACT Justo García-Sanz-Calcedo jgsanz@unex.es
© 2019 Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group

healthcare activity as an independent variable of hospital maintenance.

Lencina, Ponce, and Rubio (2019) established qualitative and quantitative differences between two hospitals in Argentina under the same conditions, one with an internal engineering department and the other had outsourced the service. The authors concluded that hospitals with an internal clinical engineering department are more efficient since they achieved acceptable results with a low investment. In a hospital without Clinical Engineering Department, the investment per maintenance contract is very high, and the works carried out do not have technical control. In that study, the authors did not establish efficiency indicators.

Jandali and Sweis (2018) identified factors affecting the maintenance management performance of hospital buildings in Amman, Jordan, and concluded that maintenance management practices were efficient. The authors did not quantify the effort involved in achieving such a state of efficiency.

García-Sanz-Calcedo and Gómez Chaparro (2017) analysed the impact of maintenance management on the energy consumption of a hospital. The authors found that an average annual increase of 6% in the time spent on preventive maintenance operations, over 5 years, resulted in a 20% decrease in the demand for corrective maintenance and an average annual saving of 500 MWh in energy consumption. The results can lead to bias in the analysis of maintenance performance and quality because the study focused on a single hospital.

Abd-Rani, Baharum, Akbar, and Nawawi (2015) analysed the relationship between maintenance strategies implemented in healthcare buildings through interviews and surveys of facility managers and end-users. The results showed that there is a clear relationship between the type of maintenance strategy performed and end-user satisfaction. The authors did not provide maintenance indicators.

Martinez-Salazar and García-Sanz-Calcedo (2019) studied the influence of maintenance operations on energy consumption and emissions of greenhouse gases in healthcare centres by fuzzy cognitive maps. The authors observed 12 relevant variables that intervene in the maximization of efficiency through diffuse cognitive maps. Although maintenance appeared as one of the most valued variables, the authors found that it does not affect the energy performance *per se*, contrary to the synergistic action of different variables, including those related to healthcare activity.

Salah, Osman, and Hosny (2017) demonstrated that, by using the Reliability Centred Maintenance (RCM) and an optimization approach, a small hospital (5200 m^2) could save between 6 and 16% in maintenance costs in comparison to traditional preventative maintenance approaches undertaken by existing maintenance contracts.

Sliteen, Boussabaine, and Catarina (2011) presented a benchmarking study of operation and maintenance costs of French healthcare facilities between 2008 and 2009. The results showed that the operational costs of utilities, maintenance and operations maintenance staff correlate significantly with the square metre of floor area. Lucas, Bulbul, Thabet, and Anumba (2013) analysed the impact of facility management on healthcare delivery thorough a case study concerning mechanical systems and critical failures in a healthcare setting in order to identify the types of information needed to adequately perform maintenance tasks. None of these authors found any correlation between hospital maintenance and healthcare activity.

The above references indicate that hospital maintenance is a transcendental task, which generates high costs and inefficiencies when it is not carried out under optimal conditions. None of the aforementioned authors interrelated the indicators of a hospital's healthcare activity with its maintenance. However, in order to be able to control the level of maintenance of a hospital, it is necessary to have reference indicators that integrate the reality of care and that allow benchmarking.

There is no precedent for work that analyses the efficiency of maintenance in a large number of hospitals, that proposes efficiency indicators, and that identifies and interrelates the variables that intervene in the process. To date, research in this field has been insufficient. There are only references of studies focused on tiny samples, usually from a single hospital, all of them with low or no statistical significance. The lack of reliable data on maintenance in a hospital prevents managers from making managerial decisions and prioritizing investments in facilities and equipment. Environmental indicators should encompass reliable information for strategy planning (Pasqualini-Blass, Gouvêa da Costa, Pinheiro de Lima, & Adriana Borges, 2017)

The objective of this paper is to evaluate the efficiency and sustainability of maintenance in private Spanish hospitals with less than 200 beds and generate indicators that allow ascertaining the real maintenance situation of a hospital. These indicators should enable determining the state of the building and propose operational solutions that would enable efficient strategies to be implemented. It would also be possible to make decisions regarding the most cost-effective application of funds for the renovation of facilities.

This study is organized into five sections. In the introduction section, the existing literature related to hospital maintenance indicators was reviewed. The process

followed in the study, data sources and calculation methods will be explained in the methodology section. The results obtained and the subsequent statistical tests will be presented and contrasted through a case study, followed by a discussion and conclusion sections, where the main outcomes are recalled, and recommend future research avenues are recommended.

Methodology

An exhaustive quantitative analysis of eight Spanish hospitals was carried out between 2012 and 2018 in the development of this research. All hospitals had similar characteristics in terms of infrastructure, mode of operation and level of maintenance. All buildings had been either built or fully renovated between 1990 and 2012, with a floor area and number of beds less than 25,000 m^2 and 200, respectively.

Maintenance incidents and operation times were obtained from each hospital's internal maintenance management system. The variables relating the healthcare actions under study were the number of annual hospitalization stays (defined as a period no shorter than overnight-lunch or overnight-dinner), hospital surgeries, outpatient surgeries, imaging studies, endoscopies, laboratory tests, births, emergency actions and hospital discharges constituting the expiration of a healthcare episode (either due to recovery, death or transfer) treated in the hospitalization area or the surgical day hospital. All the information relating to the variables mentioned above were supervised adequately by the medical-healthcare management department at each hospital.

The useful floor area of each hospital was considered as that of the outer perimeter of covered space, less the constructive elements related to the external walls, partitions, structure and installations. The useful floor areas of the hospitals under study were taken from their building projects. Information regarding the variable *number of beds* was obtained from annual publications by the Spanish Ministry (Spanish Ministry of Health, 2018).

User complaints were obtained from the internal management system of each hospital, where the written comments made by a patient or companion regarding their experience in the hospital are recorded and classified. Maintenance costs were obtained from the internal accounting of each hospital and include payments to external suppliers, the purchase of materials and the salary for maintenance operators.

Inferential statistical analysis was carried out to obtain general conclusions for the entire population, from the study of a sample, calculating the degree of reliability or significance of the results obtained. Outlier values were detected considering atypical values of all those that were outside the range $\mu \pm 3\sigma$, where μ is the mean of the parameter under assessment, and σ is the standard deviation (Barnett & Lewis, 1974). Inferential statistical analysis was performed with software IBM-SPSS Statistics v.22.

Critical installations were defined as those in which a failure would imply a lack of security or a stop in the healthcare activity. Protocols are integrated into the quality management system to ensure proper maintenance of these facilities. Thus, there are protocols to maintain the electrical installation and air conditioning of the operating rooms, intensive care units and special rooms, the generators set, the central and storage tanks and compressors/mixers of medical gases and prevention and control of Legionella in the storage and distribution of water. In addition, hospitals carry out daily preventive inspections of other facilities such as the cold production plant, heat production plant, low-voltage switchboard, transformers centre, etc.

Also considered were all preventive inspection of the facilities, performed by authorized maintenance companies, to maintain them in optimal operating condition and comply with current regulations. These revisions are recorded in a computer to keep a record of operations for each installation. The flow diagram of the maintenance actions of the hospitals analysed is shown in Figure 1.

In the hospitals studied, each maintenance engineer assumes tasks for all the centres of the organization, is responsible for the proper functioning of the facilities and has direct communication with the medical management in terms of maintenance, engineering and works. Maintenance engineers are backed by a maintenance supervisor and several technicians to deal with incidents that occur in the morning and afternoon shifts, with the night shift being carried out remotely. Any hospital user can post corrective maintenance issues. These will be resolved by the internal maintenance department or be referred to an external supplier according to the nature of the issue.

Results

The results obtained during the research are detailed below.

Analysis of parameters intrinsic to the hospital maintenance

First, the parameters intrinsic to the maintenance of the sample of hospitals studied were analysed. Table 1 shows the annual average number of maintenance operations

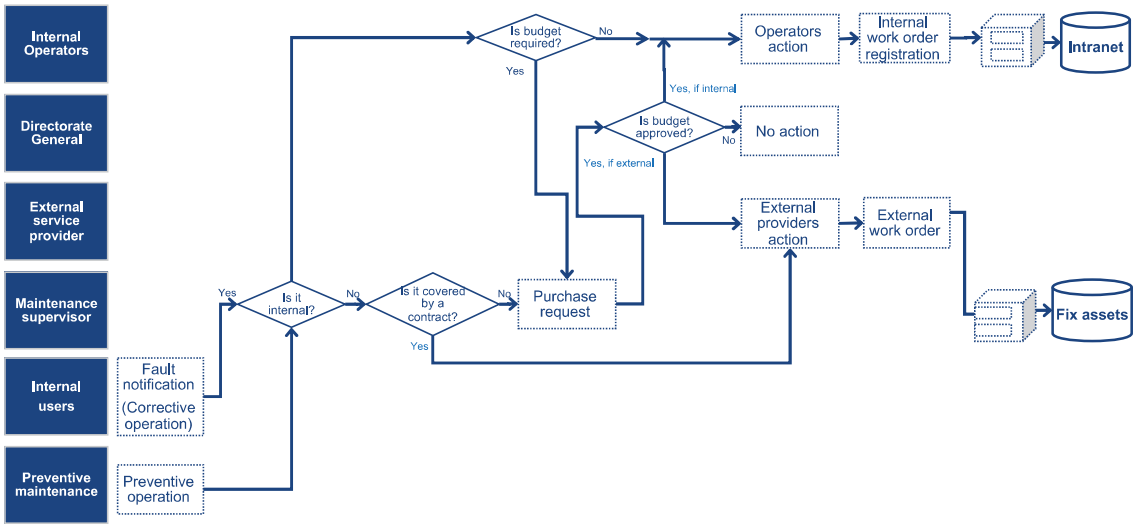


Figure 1. Flow diagram of maintenance actions.

per bed, the annual average number of maintenance operations (×1000) per m^2, the annual average time of maintenance per bed and the annual average time of maintenance (×1000) per m^2.

Preventive inspections (according to protocols, other preventive inspections, and room inspections), furniture, others and low voltage systems, respectively, account for 78.70% of maintenance operations and 78.90% of maintenance hours. Section *other preventive inspections* consists of unscheduled preventive maintenance checks (e.g. visual inspection of the boiler room and/or cold water production plant). And section *other corrective*

Table 1. Average number of operations and time dedicated to maintenance in the period 2012–2018.

Installation	Code	Average number of maintenance operations per bed: No. of operations	Average number of maintenance operations per bed: %	Average number of maintenance operations (×1000) per m^2	Average time of maintenance per bed: No. of hours	Average time of maintenance per bed: %	Average time of maintenance (×1000) per m^2
Access control	ACC	2.9	2.49%	28.7	3.5	2.19%	33.8
Construction	CON	0.6	0.55%	6.3	1.1	0.72%	10.4
Lifting devices	LIF	0.4	0.31%	3.6	0.4	0.26%	4.1
Heating, Ventilation, Air Conditioning (HVAC) and Domestic Hot Water (DHW)	ACO	6.3	5.49%	62.6	10.0	6.34%	95.4
Low voltage systems	LVO	7.9	6.83%	78.8	10.1	6.30%	96.7
Plumbing	PLU	3.8	3.25%	37.3	5.3	3.26%	50.1
Medical gases	MGA	3.5	3.06%	35.4	4.2	2.57%	39.6
Furniture	FUR	10.6	9.23%	105.9	15.3	9.93%	146.2
Other corrective works	OTR	9.0	7.79%	89.5	12.7	8.35%	121.6
Fire safety	FIR	0.3	0.24%	2.7	0.7	0.50%	7.0
Painting	PAI	1.7	1.44%	16.7	1.7	1.00%	16.4
Automatic doors	AUT	0.5	0.45%	5.2	0.7	0.45%	6.5
Communications	COM	2.3	2.01%	23.2	2.8	1.72%	26.8
Material repositions	MAT	2.3	2.01%	23.1	3.2	2.08%	30.5
Preventive inspections according to protocols	PRO	26.0	22.51%	259.7	32.2	20.15%	307.4
Other preventive inspections	PRE	20.1	17.40%	197.0	38.0	22.86%	362.0
Room preventive inspections	ROI	17.2	14.93%	172.9	19.3	11.32%	183.7
Total	Total	115.4	100%	1148.6	161.2	100%	1538.2

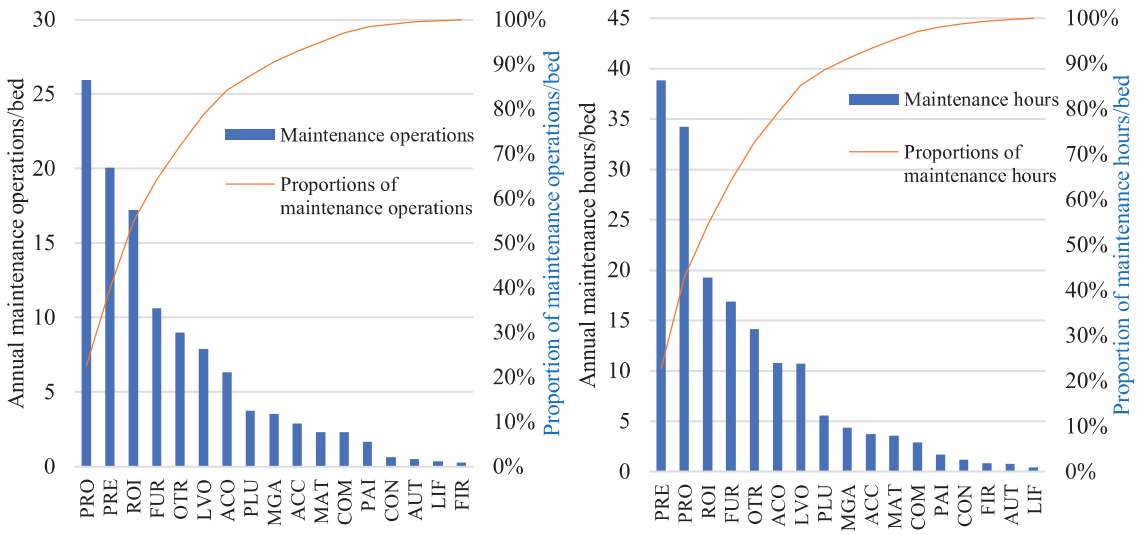


Figure 2. Average number of maintenance operations (left), average hours of maintenance operations (right) in the period 2012–2018 according to the type of facility.

works includes actions that cannot be classified in any of the above categories.

Figure 2 shows the average number of maintenance operations and hours of maintenance operations per bed respectively, according to the type of facility.

Table 2 shows the average annual values of claims and complaints of patients and/or companions registered in the hospitals analysed between 2016 and 2018. The problems associated with the installation of air conditioning, works, televisions located in hospitalization rooms and the installation of plumbing account for 76.52% of annual complaints.

Section *other problems* corresponds to malfunctions which could not be classified in any of the existing categories, for example, those related to faulty beds, bedside tables, and armchairs, among others.

Table 2. Average annual number of user complaints between 2016 and 2018.

Incident classification	Average annual no. of incidents	%
Air conditioning problems	28.33	36.51
Problems arising from refurbishment works	5.50	6.81
Electricity problems	2.00	2.51
Plumbing problems	8.00	10.19
TV signal problems	18.00	23.01
Lifting devices	5.00	6.47
Communications	4.67	6.15
Automatic doors	4.67	6.35
Other problems	1.33	2.00

Figure 3 represents the relationship between the annual average maintenance cost of a hospital, the annual average number of corrective maintenance reports and the annual average time spent on corrective maintenance operations.

Figure 4 shows the relationship found between the average time spent on maintenance operations and the number of maintenance reports. Correlations were found between the number of preventive maintenance hours and the number of preventive maintenance reports ($R^2 = 0.7829$), the number of corrective maintenance hours and the number of corrective maintenance reports ($R^2 = 0.8294$) and average time spent on total maintenance operations and the total number of maintenance reports ($R^2 = 0.9064$).

Upon analysing the adjustment line of the previous figure, the average working times for each maintenance report in each hospital can be determined according to Equation (1):

$$H = 1.65P + 262 \quad (1)$$

where P is the average annual number of reports and H is the average working time for each maintenance report in each hospital, expressed in hours. This equation applies to hospitals with less than 200 beds.

Table 3 shows the average time of fault resolution and standard deviation; both values were calculated considering all the data from the eight hospitals. The maintenance operations of construction (581.6 h), painting (572 h), furniture (170.7 h), others corrective works (48.9 h) and fire safety (44.5 h) had an above-average average resolution

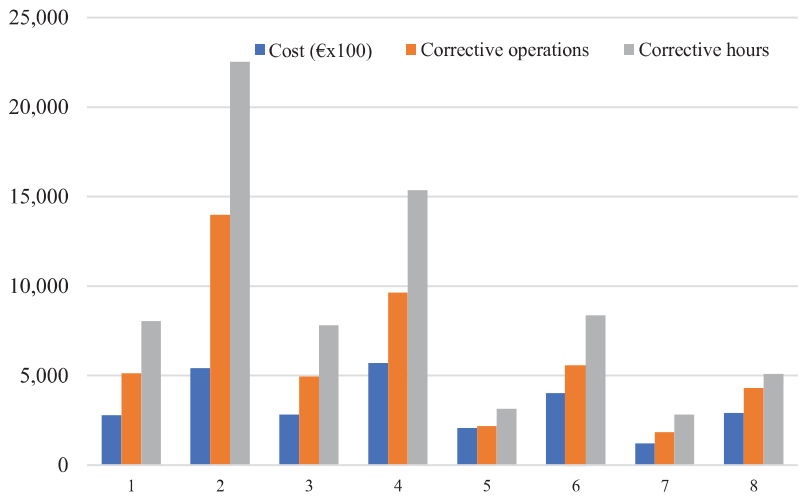


Figure 3. Annual average hours spent on maintenance operations, number of maintenance reports and total cost per year.

time. Those with the shortest average resolution time were related to preventive inspections according to protocols (3.1 h), access to restricted areas (3.2 h) especially to collect medication outside the working hours of the pharmacy service and preventive revisions (3.2 h).

Analysis of parameters intrinsic to the hospital's healthcare activity

Table 4 shows the determination coefficients calculated by relating the average healthcare activity of a hospital with the maintenance costs, the number of corrective maintenance reports, the number of preventive maintenance reports and the average maintenance time.

There is a strong correlation between maintenance costs and healthcare activity, especially hospital stays and the number of endoscopies. There is also a correlation between healthcare activity and the number of reports and hours of corrective maintenance, especially with consultations attended, the number of endoscopies and hospital stays.

Statistical analysis

The results obtained from the statistical analysis of variance (ANOVA), which studies the relationship between the factors listed in Table 5 and the efficiency of maintenance, in relation to the variables analysed, are presented

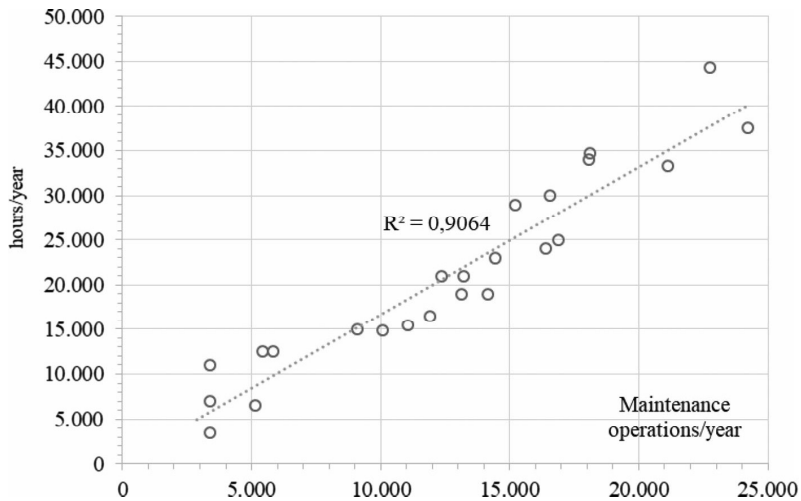


Figure 4. Relationship between the time spent on maintenance operations and the number of maintenance reports between 2016 and 2018.

Table 3. Fault resolution average time and standard deviation considering all the data from the hospitals under study.

Installation	Average time (h)	Standard deviation
Access control	3.2	0.97
Refurbishment works	581.6	197.57
Lifting devices	22.1	5.81
Heating, Ventilation, Air Conditioning (HVAC) and Domestic Hot Water (DHW)	18.4	6.21
Low voltage systems	24.0	5.78
Plumbing	26.4	7.84
Medical gases	8.7	2.97
Furniture	76.4	14.23
Others corrective works	48.9	12.25
Fire safety	44.5	8.57
Painting	572.0	143.21
Automatic doors	24.6	9.68
Communications	5.6	0.87
Material repositions	6.0	2.06
Preventive inspections according to protocols	3.1	0.89
Other preventive inspections	3.2	0.73
Room preventive inspections	4.6	1.95
Total	28.35	9.35

below. The following hypotheses were established in the analysis:

- Null hypothesis (H_0): The factor studied (building age, useful floor area, number of beds, stays, discharges and annual outpatient consultations) does not influence the annual cost of maintaining a hospital.
- Alternative hypothesis (H_1): The factor studied influences the annual maintenance of a hospital.

Table 5. Distribution regarding factors.

factors	Distribution Regarding Factors
Building age (years)	<10 ≥10
Useful area (m^2)	<10,000 ≥10,000
No. of beds	<100 ≥100
No. of stays per year	<25,000 ≥25,000
No. of discharges per year	<8000 ≥ 8000
No. of consultations per year	< 200,000 ≥ 200,000

The *p-value* was compared with the level of significance to determine whether any of the differences between the means of the studied factors is statistically significant and to assess the null hypothesis. A level of significance of 5% (95% confidence) was considered for this study. If the *p-value* is less than or equal to the level of significance, i.e. $p \leq .05$, the null hypothesis can be rejected, and it could be concluded that not all population means are equal. Otherwise, if the value of p is higher than the level of significance, there is not enough evidence to reject the null hypothesis. The *F Snedecor* test to carry out of statistical significance was performed.

It was found that the more annual hospital stays, the more the annual maintenance costs ($F = 9.01$; $p = .0239$). However, it was observed that hospitals with more than 25,000 annual stays generate less cost per area ($F = 15.87$: $p = .00725$), fewer maintenance reports per unit of useful area (m^2) ($F = 8.123$; $p = .0291$), and fewer reports per bed ($F = 5.62$; $p = .0554$) than hospitals with less than 25,000 annual stays. It was also shown that the age of

Table 4. Correlation coefficients between the healthcare activity of hospitals and the maintenance cost and between the number of reports and time of maintenance operations.

	Pearson' product-moment correlation coefficient						
Variables	Annual maintenance cost	No. of corrective reports	No. of preventive reports	Total reports	No. of corrective hours	No. of preventive hours	Total hours
Stays	0.8901*	0.7684	0.0100	0.2969	0.7260	0.0010	0.2150
Hospital discharges	0.8525*	0.6914	0.0005	0.2283	0.6386	0.0040	0.1461
Consultations attended	0.7343	0.8137*	0.0041	0.2061	0.8339*	0.0185	0.1789
No. endoscopies-colonoscopies	0.8920*	0.8527*	0.0479	0.4738	0.6903	0.0628	0.3863
Laboratory studies	0.8351*	0.7581	0.0003	0.2264	0.5563	0.0064	0.1662
No. of emergencies	0.6214	0.6164	0.0796	0.0307	0.4531	0.1105	0.0132
No. of imaging studies	0.6624	0.6803	0.0011	0.2342	0.6703	0.0035	0.1810
No. of ambulatory surgeries	0.0544	0.1576	0.3695	0.1444	0.0451	0.6040	0.1578
No. of surgeries	0.6757	0.5785	0.0880	0.0854	0.4087	0.1846	0.0370

*Correlations found in the research.

the building does not increase either the cost or the annual number of maintenance reports.

It was also shown that although hospitals with more useful floor area generate more maintenance costs ($F = 20.761$; $p = .00386$), hospitals larger than 10,000 m^2 have lower maintenance costs per area unit ($F = 15.87$; $p = .00725$), fewer maintenance reports per bed ($F = 5.62$; $p = .055$) and fewer maintenance reports per area ($F = 8.12$; $p = .0291$).

Additionally, it was proven that the annual maintenance cost per useful floor area is lower in hospitals with more than 100 beds than in hospitals with less than 100 beds ($F = 15.87$; $p = .00725$). It was also found that more annual reports per bed are generated in hospitals with less than 100 beds than in hospitals with more than 100 beds ($F = 5.62$; $p = .055$) and more reports per area unit are generated in hospitals with less than 100 beds than in hospitals with more than 100 beds ($F = 8.12$; $p = .0291$).

Finally, it was found that fewer reports per bed are generated in hospitals with more than 200,000 outpatient visits per year ($F = 8.47$; $p = .027$). Concerning annual maintenance costs, it was found that hospitals with more than 200,000 external consultations per year have a lower cost per area unit ($F = 34.92$; $p = .0010$) and also generate fewer reports per area unit ($F = 12.40$; $p = .0169$) than hospitals with fewer than 200,000 external consultations per year.

Annual costs to maintain a hospital

A multivariable regression statistical study was carried out, analysing all possible combinations of the independent variables. The coefficients of Equations (2) and (3) were calculated using statistical techniques of multivariate regression, taking into account all the values in the sample. A level of significance of 5% (95% confidence) was considered for this study by applying the Student t-test.

$$C = 5.68 \times E + 6.013 \times S + 117,170 \quad (2)$$

$$C = 4.99 \times E + 7.34 \times P + 4.30 \times S + 58,869 \quad (3)$$

where C is the average annual cost of maintaining a hospital expressed in euros, E is the average number of annual patient stays, P is the average annual number of maintenance reports and S is the useful floor area of each hospital, expressed in m^2. This equation is valid for hospitals between 20 and 200 beds.

Table 6 shows the probably p-values for each variable.

Equation (2) that can be used to calculate the average annual cost of maintaining a hospital between 20 and 200 beds in Spain, both in operating hospitals and those under construction. Equation (3) is only applicable to operating hospitals, since it is necessary to know in advance the historical number of annual maintenance parts.

The residues were used to see if the linear regression model was adequate. Figure 5 shows the resulting probability graph, in which the normality of the data set is verified and with it, the validity of Equations (2) and (3).

Case study

The HM Madrid Hospital, located in the city of Madrid (Spain), was used as a case study to validate equations 2 and 3. This centre has 99 beds, 9 operating theatres and a useful surface area of 6178 m^2. The hospital was completely refurbished in 2011 and the factor – 'age of building' could be omitted. The operating records for 2014, 2015, 2016, 2017 and 2018 were collected. The annual average number of stays was 24,958 and the annual average number of maintenance reports was 11,984. The average annual maintenance cost was 290,158.36 €. Table 7 shows the results after applying Equations (2) and (3).

It was observed that, by applying Equation (2), the error committed was less than 2.05%, and by using Equation (3), under 2.69%. Therefore, since these are minimum errors both equations are valid. Some operative indicators of HM Madrid hospital are shown in Table 8. Section 'internal operators cost' corresponds to the expenditure in gross salaries (including taxes, social security and vocational training) for maintenance workers.

The hospital managers and the maintenance responsible heads will be able to compare the operation of hospitals and to quantify the scope for improving that it can

Table 6. Equations (2) and (3) regression statistics.

Eq.	Adjusted R^2	Variable	Coefficients	Standard error	T-test	p-Value
(2)	0.9652	Ind.	117,170.77	17704.4	6.618	.00118
		E	5.681	0.9315	6.098	.00171
		P	6.013	1.8770	3.203	.02390
(3)	0.9872	Ind.	58,868.92	15350.4	3.834	.01853
		E	4.989	0.6255	7.976	.00133
		P	7.344	1.4198	5.1725	.00664
		S	4.297	1.3052	3.292	.03015

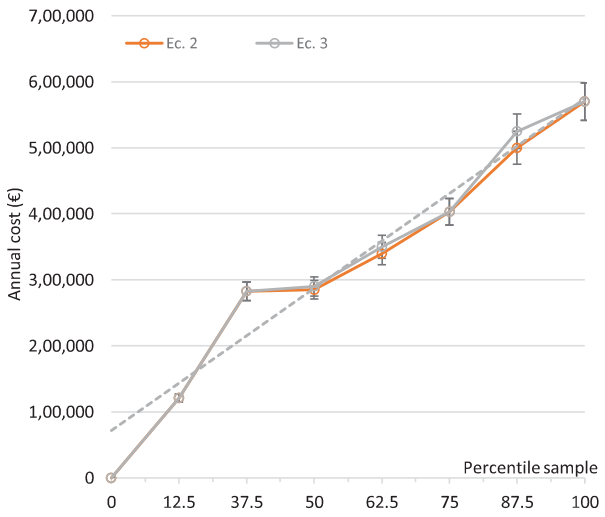


Figure 5. Normal probability regression test.

Table 7. Comparative study between the estimated values and the real value of HM Madrid hospital.

Variable	Equation (2)	Equation (3)
Real value (€)	290,158.36	
Estimated values (€)	296,105.48	297,941.74
Difference (€)	5947.12	7783.38
Error (%)	2.0496	2.6825

be achieved in their maintenance policy, by using of the Equations (2) and (3) and the indicators showed in Table 6. In addition, it will be possible to set management objectives, implement contingency plans to reduce costs, and apply incentives to involve workers in the management of maintenance and in the improvement of the usability of facilities. The results are also suitable to establish for collective awareness strategies to promote hospital sustainability.

Discussion

It was observed that older installations tend to increase maintenance costs regardless of the age of the building. The age of the building does not decisively influence the efficiency of maintenance, among other reasons because hospitals undergo continuous renovation works that update the facilities (Carretero-Ayuso & García-Sanz-Calcedo, 2018). In the research, it has been contrasted that for the purposes of the reliability of a hospital, the age of the energy installations is more important than that of the building itself. Also, the age of HVAC installations was highly related to energy consumption was found. On the other hand, Shohet et al.

Table 8. Indicators related to the maintenance of HM Madrid hospital.

Indicator	Units	Preventive	Corrective	Total
Annual maintenance operations per useful floor area	*N*(×1000)/ m^2	1289.95	649.83	1939.78
Annual maintenance operations per bed	*N*/bed	75.05	45.99	121.04
Annual maintenance operations per staff	*N*/operator	1657.66	892.59	2550.25
Number of maintenance operations per stay	*N*/stay	0.29	0.18	0.47
Annual maintenance hours per m^2 of usable floor area	Hours (×1000)/ m^2	635.65	389.59	1025.24
Annual maintenance hours per bed	Hours/bed	93.85	60.01	153.86
Maintenance hours per stay	Hours/stay	0.64	0.33	0.97
Internal operators cost per maintenance operation	€	8.37		
Maintenance cost per maintenance operation	€	24.21		
Annual maintenance cost per bed	€/bed	2930.88		
Annual maintenance cost per m^2	€/m^2	46.97		
Maintenance cost per stay	€/stay	11.63		
No. of staff per m^2 of useful floor area	*N*/m^2 (×1000)	0.29		
No. of staff per bed	*N*/bed (×1000)	38.95		
No. of staff per annual stay	*N*/stay (×1000)	0.26		

(2003), through a sample of 17 hospitals in Israel, observed that the age of the building conditions the efficiency of maintenance. The difference is that at

present, the level of renovation of hospital facilities in Spain is higher.

In all the hospitals studied, it was observed that there is an essential relationship between the annual number of corrective maintenance reports and maintenance costs, hospital floor area and hospital stays and the number of beds. However, it has been proven that larger hospitals generate fewer preventive maintenance reports; this is because the maintenance management establishes a minimum number of preventive inspections through maintenance protocols but does not limit the total amount of preventive operations to be performed on the facilities. In any case, the relationship between the number of hours of corrective maintenance and the cost of maintenance ($R^2 = 0.8070$) indicates that there is an adequate distribution of the resources among hospitals.

In this study, it was found that 48.58% of the annual expenditure of a maintenance department in a hospital is centred on the salary of maintenance workers, 7.80% on the purchase of materials and 43.62% was used to pay external suppliers. Adequately sizing the human resources needed to carry out maintenance correctly allows assessing the fixed costs of each hospital. Although the relationship found between maintenance costs and healthcare activity must be understood as greater use of facilities leads to greater deterioration thereof, the exact opposite has been demonstrated, i.e. hospitals with greater intensity of use are more efficient from the point of view of maintenance.

Therefore, the connection between the building and the maintenance management, the senior management and the building management system needs more efficiency of the building's life-cycle (Puķīte & Geipele, 2017). To this end, indicators are required to be able to carry out correct maintenance management (Shohet & Nobili, 2017).

It was proven that the average number of annual patient stays is a direct measure of the use of the hospital facilities, because when more stays there are in a hospital, the greater is the use of its facilities.

In addition, number of beds and/or operating theatres was found how an objective indicator of the complexity of a hospital and its installations.

The facilities that need to be given more attention were also determined as they generate more costs, incidents and work time (Lin, Afshari, & Azar, 2018). User complaints focus on refurbishment works, air conditioning and television installations of hospitalization rooms. It has been proven that one of the installations that generates the most complaints and maintenance claims is HVAC systems, which coincides with what was studied by other authors (Chiang, Yang, Yang, & Lee, 2017; Teke & Timur, 2014). It has been found that hospital buildings generally cover all functional requirements but are often unable to meet the psychological needs of patients and their companions (Garip, 2011).

Maintenance operators must be technicians capable of resolving all types of incidents, with basic knowledge of electricity, air conditioning and medical equipment (Marmolejo-Correa, Juarez-Valdivia, & Rodriguez-Navarro, 2016), according to the type of maintenance incidents and patient complaints analysed in this paper. The use of Big Data and the internet of things will soon make it necessary to adapt the management of hospital maintenance to these technologies (Gunay, Shen, & Yang, 2019), which, in the long run, will improve the efficiency of maintenance (Çoban, Gökalp, Gökalp, Eren, & Koçyiğit, 2018) and generate a higher professional qualification of maintenance operators (Hassanain, Assaf, Al-Ofi, & Al-Abdullah, 2013). Therefore, the interdisciplinary development of national standards and tools requires centralized investment to facilitate nationwide learning and improvements in outcomes (Mills, Phiri, Erskine, & Price, 2015).

The design of a hospital conditions its subsequent maintenance. Therefore, strategies, resources (material and human), and operating costs derived from maintenance operations must be taken into account in the designing phase of a healthcare building and its installations (Sanchez-Barroso & García-Sanz-Calcedo, 2019). In this sense, design techniques for maintainability (Jaafar & Othman, 2013) and evidence-based design must be followed (McCuskey Shepley, 2010).

Conclusions

This research is useful to facilitate decision-making to maintenance managers as the ratios found allow unusual situations to be detected when comparing resources used in other hospitals with similar equipment and facilities. It is also useful for continuous improvement by comparing the hospital's own behaviour in different annuities. In addition, the results can be extrapolated to other countries with the same socioeconomic background and a similar level of healthcare services. Future work should aim to establish the relationship between the efficiency of maintenance between public and private hospitals.

The results demonstrate the existence of a determining relationship between the healthcare activity of a hospital and its intensity of maintenance. During the research, an equation that permits estimating the annual maintenance cost of a hospital according to the number of stays per year, useful floor area and number of beds,

was found. A series of hospital maintenance indicators that allow comparing efficiency and sustainability among hospitals were also proposed.

It was observed that hospitals with more than 25,000 annual stays generate lower costs and reports per area unit per year and fewer reports per bed, than hospitals with less than 25,000 annual stays. It was also found that hospitals larger than 10,000 m^2 have less maintenance cost per area, fewer maintenance reports per bed and fewer maintenance reports per area. Furthermore, the annual cost of maintenance per unit of floor area is less in hospitals with more than 100 beds than in hospitals with less than 100 beds.

In addition, efficiency indicators that allow ascertaining the real maintenance situation of a hospital are also provided. These indicators should enable to determine the state of the building and propose operational solutions that would allow for efficient strategies to be implemented. For example, in the case of a high *annual corrective maintenance operations* indicator, the *number of preventive* maintenance operations should be increased. However, a high *annual maintenance cost* indicator would imply that some facilities require strategic renovation.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.

Funding

The authors wish to acknowledge the HM Hospitals and the European Social Fund for the financial support provided through Research Projects GR18029 linked to the VI Regional Plan for Research, Technical Development and Innovation from the Regional Government of Extremadura (2017–2020).

ORCID

Justo García-Sanz-Calcedo http://orcid.org/0000-0003-4449-2636

References

Abd-Rani, N. A., Baharum, M. R., Akbar, A. R. N., & Nawawi, A. H. (2015). Perception of maintenance management strategy on healthcare facilities. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, *170*, 272–281.

Barnett, V., & Lewis, T. (1974). *Outliers in statistical data*. Chichester, UK: Wiley.

Carnero, M. C., & Gómez, A. (2016). A multicriteria decision-making approach applied to improving maintenance policies in healthcare organizations. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, *16*(1), 47.

Carretero-Ayuso, M. J., & García-Sanz-Calcedo, J. (2018). Analytical study on design deficiencies in the envelope projects of healthcare buildings in Spain. *Sustainable Cities and Society*, *42*, 139–147.

Chiang, C. Y., Yang, R., Yang, K. H., & Lee, S. K. (2017). Performance. Analysis of an integrated heat Pump with Air-conditioning system for the existing hospital building application. *Sustainability*, *9*(4), 530.

Chías, P., & Abad, T. (2017). Green hospitals, Green healthcare. *International Journal of Energy Production and Management*, *2*(2), 196–205.

Chyu, M. C., Austin, T., Calisir, F., Chanjaplammootil, S., Davis, M. J., Favela, J., … Zhang, Y.-T. (2015). Healthcare engineering defined: A white paper. *Journal of Healthcare Engineering*, *6*(4), 635–648.

Ciarapica, F. E., Giacchetta, G., & Paciarotti, C. (2008). Facility management in the healthcare sector: Analysis of the Italian situation. *Production Planning & Control*, *19*(4), 327–341.

Çoban, S., Gökalp, M. O., Gökalp, E., Eren, P. E., & Koçyiğit, A. (2018). Predictive maintenance in healthcare services with Big data technologies. *2018 IEEE 11th Conference on Service-Oriented Computing and Applications (SOCA)*, 93–98.

García-Sanz-Calcedo, J., & Gómez Chaparro, M. (2017). Quantitative analysis of the impact of maintenance management on the energy consumption of a hospital in Extremadura (Spain). *Sustainable Cities and Society*, *30*, 217–222.

Garip, E. (2011). Environmental cues that affect knowing: A case study in a public hospital building. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, *30*, 1770–1776.

Gunay, H. B., Shen, W., & Yang, C. (2019). Text-mining building maintenance work orders for component fault frequency. *Building Research & Information*, *47*(5), 518–533.

Haggard, L., & Hosking, S. (2003). *Healing the hospital environment: Design, management and maintenance of healthcare premises*. London: Taylor & Francis.

Hassanain, M. A., Assaf, S., Al-Ofi, K., & Al-Abdullah, A. (2013). Factors affecting maintenance cost of hospital facilities in Saudi Arabia. *Property Management*, *31*(4), 297–310.

Jaafar, M., & Othman, N. L. (2013). Maintainability and design aspect of public hospital. *Jurnal Teknologi*, *78*(5), 107–113.

Jandali, D., & Sweis, R. (2018). Assessment of factors affecting maintenance management of hospital buildings in Jordan. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, *24*(1), 37–60.

Lencina, M. H., Ponce, S., & Rubio, D. (2019). Hospitals with and without clinical engineering department: Comparative analysis. In *World congress on medical physics and biomedical engineering 2018* (pp. 347–350). Singapore: Springer.

Lin, M., Afshari, A., & Azar, E. (2018). A data-driven analysis of building energy use with emphasis on operation and maintenance: A case study from the UAE. *Journal of Cleaner Production*, *192*, 169–178.

Lucas, J., Bulbul, T., Thabet, W., & Anumba, C. (2013). Case analysis to identify information links between facility management and healthcare delivery information in a hospital setting. *Journal of Architectural Engineering*, *19*(2), 134–145.

Macek, D., & Dobiáš, J. (2014). Buildings renovation and maintenance in the public sector. *Procedia Engineering*, *85*, 368–376.

Marmolejo-Correa, D., Juarez-Valdivia, R. G., & Rodriguez-Navarro, A. (2016). Optimization of preventive

maintenance program for imaging equipment in hospitals. *Computer Aided Chemical Engineering*, *38*, 1833–1838.

Martinez-Salazar, E., & García-Sanz-Calcedo, J. (2019). Study on the influence of maintenance operations on energy consumption and emissions in healthcare centres by fuzzy cognitive maps. *Journal of Building Performance Simulation*, *12* (4), 420–432.

McCuskey Shepley, M. (2010). Developing evidence for sustainable healthcare. *Building Research & Information*, *38* (3), 359–361.

Mills, G. R. W., Phiri, M., Erskine, J., & Price, A. D. F. (2015). Rethinking healthcare building design quality: An evidence-based strategy. *Building Research & Information*, *43*(4), 499–515.

Mwanza, B. G., & Mbohwa, C. (2015). An assessment of the effectiveness of equipment maintenance practices in public hospitals. *Procedia Manufacturing*, *4*, 307–314.

Pasqualini-Blass, A., Gouvêa da Costa, S. E., Pinheiro de Lima, E., & Adriana Borges, L. (2017). Measuring environmental performance in hospitals: A practical approach. *Journal of Cleaner Production*, *142*(1), 279–289.

Puķīte, I., & Geipele, I. (2017). Different approaches to building management and maintenance meaning explanation. *Procedia Engineering*, *172*, 905–912.

Salah, M., Osman, H., & Hosny, O. (2017). Performance-based reliability-centered maintenance planning for hospital facilities. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, *32*(1), 04017113.

Sanchez-Barroso, G., & García-Sanz-Calcedo, J. (2019). Evaluation of HVAC design parameters in high-performance hospital operating theatres. *Sustainability*, *11*, 1493.

Schaumann, D., Breslav, S., Goldstein, R., Khan, A., & Kalay, Y. E. (2017). Simulating use scenarios in hospitals using multi-agent narratives. *Journal of Building Performance Simulation*, *10*(5–6), 636–652.

Shohet, I. M., & Lavy, S. (2017). Facility maintenance and management: A health care case study. *International Journal of Strategic Property Management*, *21*(2), 170–182.

Shohet, I. M., Lavy, S., & Bar-On, D. (2003). Integrated maintenance monitoring of hospital buildings. *Construction Management and Economics*, *21*(2), 219–228.

Shohet, I. M., & Nobili, L. (2017). Application of key performance indicators for maintenance management of clinics facilities. *International Journal of Strategic Property Management*, *21*(1), 58–71.

Sliteen, S., Boussabaine, H., & Catarina, O. (2011). Benchmarking operation and maintenance costs of French healthcare facilities. *Journal of Facilities Management*, *9*(4), 266–281.

Spanish Ministry of Health. (2018). *Social services and equality*. Madrid: National Hospital Catalogue.

Teke, A., & Timur, O. (2014). Assessing the energy efficiency improvement potentials of HVAC systems considering economic and environmental aspects at the hospitals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *33*, 224–235.

Yousefli, Z., Nasiri, F., & Moselhi, O. (2017). Healthcare facilities maintenance management: A literature review. *Journal of Facilities Management*, *15*(4), 352–375.

I.2 Assessment of the maintenance costs of electro-medical equipment in Spanish hospitals

Datos del artículo

Título en español: Evaluación de los costes de mantenimiento de equipos electromédicos en hospitales españoles.

Autores: Juan Aunión Villa, Miguel Gómez-Chaparro, Justo García Sanz-Calcedo.

Nombre de la revista: Expert Review of Medical Devices.

ISSN: 1743-4440.

Editorial: Taylor & Francis.

Área temática de la revista: Biomedical Engineering & Medicine & Surgery.

Año de publicación: 2020.

DOI: 10.1080/17434440.2020.1796635.

Volumen: 17 (8).

Páginas: 855-865.

Indicios de calidad

Base de Indexación: Journal Citation Report

Edición: Science Citation Index Expanded (SCIE)

Categoría: Engineering, Biomedical

Posición: 45 de 90.

Cuartil: Q2

Tercil: T2

Factor de Impacto Journal Citation Report (2020): 3,166

Eigenfactor normalizado: 0.75750

Número de citas en Web of Science: 0.

Número de citas en Scopus: 1.

Número de citas en Scholar: 3.

Número de citas en Researchgate: 3.

Expert Review of Medical Devices

ISSN: (Print) (Online) Journal homepage: https://www.tandfonline.com/loi/ierd20

Assessment of the maintenance costs of electro-medical equipment in Spanish hospitals

Juan Aunión-Villa , Miguel Gómez-Chaparro & Justo García Sanz-Calcedo

To cite this article: Juan Aunión-Villa , Miguel Gómez-Chaparro & Justo García Sanz-Calcedo (2020) Assessment of the maintenance costs of electro-medical equipment in Spanish hospitals, Expert Review of Medical Devices, 17:8, 855-865, DOI: 10.1080/17434440.2020.1796635

To link to this article: https://doi.org/10.1080/17434440.2020.1796635

Published online: 04 Aug 2020.

Submit your article to this journal

Article views: 17

View related articles

View Crossmark data

Full Terms & Conditions of access and use can be found at
https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=ierd20

EXPERT REVIEW OF MEDICAL DEVICES
2020, VOL. 17, NO. 8, 855–865
https://doi.org/10.1080/17434440.2020.1796635

Taylor & Francis
Taylor & Francis Group

ORIGINAL RESEARCH

Check for updates

Assessment of the maintenance costs of electro-medical equipment in Spanish hospitals

Juan Aunión-Villa[a], Miguel Gómez-Chaparro[b] and Justo García Sanz-Calcedo [c]

[a]Engineering Project Area, University CEU San Pablo, Madrid, Spain; [b]HM Hospitals Engineering Department, Madrid, Spain; [c]Department of Engineering Projects, University of Extremadura, Badajoz, Spain

ABSTRACT

Objectives: Electro-medical equipment generates a high impact on the sustainability of a hospital and require high availability at a reasonable maintenance cost. The aim of this paper is to analyze the sustainability and performance of the maintenance of electro-medical equipment, through several healthcare variables (hospital admissions, surgeries, consultations, etc.), infrastructure variables (surface area, number of beds, number of operating theaters, etc.), human resources and the acquisition value of the equipment, relating them to the labor, materials and total and operative maintenance costs.
Methods: 4,586 electro-medical equipments were analyzed (grouped into 16 categories) installed in 12 Spanish hospitals of between 20 and 200 beds during the 2016–2018 period.
Results: The results show that the maintenance costs of electro-medical equipment correlate with the number of beds and operating theaters, nursing staff, equipment acquisition value, number of admissions, surgeries and the total length of hospital stay.
Conclusion: Different equations are proposed to estimate maintenance costs based on the variables studied. They include indicators that give an overall view of maintenance operations.

ARTICLE HISTORY
Received 30 April 2020
Accepted 10 July 2020

KEYWORDS
Reliability engineering; electro-medical equipment; medical equipment failure; healthcare engineering; biomedical engineering

1. Introduction

Hospital management is directly subject to its economic and environmental sustainability [1]. Hospitals are heavily dependent on technology, as they rely on a multitude of electromedical devices based on different physical principles of operation: heat, electricity, magnetism, radiation, microwaves, etc [2]. This equipment can be classified as invasive, life support, diagnosis, etc. This classification allows segmenting them and treating each type in a particular way [3]. Despite the differences between them, these devices have many features in common, such as the importance of patient and user safety, the need for maintenance throughout their useful life, obsolescence monitoring, robustness and suitability for hospital use [4]. Furthermore, they must comply with the standards at the time of sale and the regulations in force thereafter [5,6].

Adequate maintenance of the electromedical equipment of a hospital must guarantee its operation in the best possible conditions, providing safety and user comfort [7,8]. The safety and optimum operation of the equipment must also be guaranteed throughout the entire life cycle, i.e. from acquisition, installation and commissioning to disposal as well as its treatment as electrical waste, ensuring adequate processing of risk components and recovery of others for reuse [9,10].

This paper covers monitoring, respiratory, surgery, sterilization, oftalmology, endoscopy, neonatal, neurology equipment, among others. A draft calculation of this equipment anual maintenance costs could be established at 5% of it is acquisition costs within a band going from 2% to 10% depending on the specific device [11].

Any improvement in operating costs has a direct impact on the hospital's EBITDA (Earnings Before Interest Taxes Depreciation and Amortization), implying that the item is released for use in other areas or simply as savings [12]. Cost savings is a goal for every public or private healthcare organization every where in the World [13].

There appear to be no precedents for research that analyze the efficiency and sustainability of the maintenance of electromedical equipment in a large number of hospitals, that propose performance indicators and that identify and interrelate the variables involved in its maintenance. There are only references to studies or surveys focused on very small samples with low statistical significance and a high degree of bias. The lack of reliable data on the maintenance of electromedical equipment in a hospital makes it difficult for administrators to make management decisions and prioritize investments in facilities and equipment.

Medical devices regulatory framework in Europe has been updated in 2017 [14], better adapting to industry innovations. In particular, the new regulations extend the definition of medical device, improve the availability of clinical data for research and equipment traceability. Migliori (2019) raised the key elements of the HTA (Health Technology Assessment) regulation proposal [15]. Imagawa et al. (2018) analyzed regulatory convergence in electromedical equipment through the International Organization for Standardization

CONTACT Justo García Sanz-Calcedo jgsanz@unex.es Department of Engineering Projects, University of Extremadura Avda. Elvas s/n, 06006 Badajoz, Spain
© 2020 Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group

Article highlights

- The sustainability and performance of the maintenance of electro-medical equipment were analyzed.
- Four thousand five hundred and eighty-six electro-medical equipment installed in 12 Spanish hospitals of between 20 and 200 beds during the 2016–2018 period were analyzed.
- Maintenance costs of electro-medical equipment were correlated with the number of beds and operating theatres, nursing staff, equipment acquisition value, number of admissions, surgeries and the total length of hospital stay.
- Different equations to estimate maintenance costs based on the variables studied are proposed.
- Indicators that give an overall view of maintenance operations are proposed.

(ISO) and the International Electrotechnical Commission (IEC) standards [16]. Umbelino et al. (2019) surveyed some of the primary international standards applied to hospital maintenance to ensure compliance with operating specifications in Portugal [17]. Setting standards enables hospital processes to be optimized, including maintenance costs, but does not provide explicit relationships between variables or indicators.

Some studies on maintenance processes efficiency of critical devices used in ICUs and operation rooms are available. Mendes et al. (2019) described some relevant aspects of electromedical maintenance activities based on audits of operating theaters and recovery rooms, as strategic activities in the field of hospital maintenance [18]. However, they did not study the frequency of failures of the equipment. Özdemirci et al. (2014) studied infant incubators analyzers in a hospital in Turkey, assessing the shortcomings that had arisen in the light of clinical metrology standards and studies [19]. Daneri (2007) analyzed several intensive care teams from a technical and operational point of view [20]. Picazo (2011) analyzed the improvement of the maintenance system for highly critical equipment by applying the RCM Methodology (Reliability Centered Maintenance Methodology) [21]. Nevertheless, these studies are limited in coverage to a few equipment categories and normally to a single hospital, loosing holistic vision.

There is also literature that analyzes equipment inventory and breakdown information for medical devices improvement through predictive statistical techniques and the proper use of databases. For example, Noor et al. (2016) relate inventory information with maintenance improvement of and cost saving programs in the Indian Health system [22]. Abdel-Wahed et al. (2010) uses statistical techniques such as Autoregressive Moving Average (ARMA) and Linear Predictive Coefficient (LPC) filters to predict failures [23]. On the other hand, Noor et al. (2016) provide a predictive model based on the analysis of the time series of failures [24]. However, these authors do not relate the maintenance variables with others of a healthcare or infrastructure type and generally limit themselves to a few categories of equipment.

Other authors describe maintenance practices through expert polls. Murillo et al. (2013) surveyed maintenance managers at 11 healthcare providers in Medellín (Colombia) and found that the most common cause of failure of electromedical equipment in the emergency service was poor handling of equipment (75%) by users [25]. Orozco et al. (2015) surveyed the maintenance management of the most complex biomedical equipment used in emergency areas; they found that its maintenance ensures an 86% success rate, while the management of metrology and maintenance in biomedical equipment, 96% [26]. Mwanza et al. (2015) assessed the effectiveness of maintenance practices used on equipment in three South African public hospitals through 55 surveys administered to operators and other workers [27]. The results showed a high rate of equipment unavailability, attributing the high failure rates to scheduling systems and high rates of equipment failures. These authors based their study in several hospitals, but do not establish relationships with other hospital areas results, nor quantify operational costs as a consequence of medical devices maintenance.

There are also papers that evaluate maintenance processes efficiency or present indicators to be evaluated. Mahfoud et al. (2017) analyzed the effectiveness of maintenance management by examining the relationship between variables (types of maintenance strategy, reliability criteria, maintenance costs and risks) in a study at a Moroccan health center to improve the medical device maintenance management [28]. They did not include variable others than the ones linked to maintenance activity.

Gonnelli et al. (2017) created a set of technical, financial and organizational Key Performance Indicators (KPIs) to assess the maintenance of 13 types of electromedical equipment [29]. The results are limited to a single large hospital (1,367 beds) and cannot be extrapolated to others of different sizes. Gonzalez et al. (2018) also proposed other performance indicators applicable to public sector hospitals in Germany but also failed to consider maintenance parameters [30]. Herrera-Galán and Natasha-Walker (2018) assessed the Maintenance Management Programme for medical equipment in the South-East Region of Jamaica and proposed a procedure to efficiently assess and control the operational management in the Maintenance Unit of a pediatric hospital [31].

Other papers grade preventive and corrective maintenance procedures, but usually limited to a few equipment types or single hospitals. Escobar et al. (2015) described a computer simulation tool applied to the preventive maintenance of electromedical equipment [32]. However, they did not analyze operating costs and limited their scope to a few families of equipment.

Coelho (2017) described the technical procedures for preventive and corrective maintenance of several families of electromedical equipment in a Portuguese hospital [33]. The analysis was carried out from the point of view of an external maintenance company, so it is limited to the integration of this service with healthcare services.

From other side, some tasks have been analyzed for maintenance managers´ decision making support, as suppliers selection or critical devices prioritization. Santana et al. (2018) adopted generalized renovation processes to model repairs of electromedical equipment to indicate the best option for hospitals to arrange maintenance [34]. To this end, they developed a method of simulating discrete events

and applied it to an angiography device. Torres-Sarango et al. (2019) provide a model for multicriteria decision making to prioritize equipment repairs based on criticity, age and functionality [35]. These authors focused on the reliability of the equipment but did not relate it to the rest of the hospital environment.

This paper analyzes the sustainability of the maintenance of electromedical equipment in hospitals to identify, analyze and relate resource parameters (surface area, beds, operating theaters, nursing, etc.) and healthcare parameters (hospital admissions, consultations, surgeries, etc.) with maintenance parameters (use, availability and cost). It is thus possible to establish performance indicators and cost estimates based on readily obtainable healthcare data, which can allow hospital system managers to make the most appropriate, effective and efficient decisions.

2. Methodology

The research was carried out between 2016 and 2018 in 12 private Spanish hospitals with 20 to 200 beds, where 4,586 pieces of electromedical equipment, grouped into 16 categories and 20 services, were analyzed.

The study has been carried out on a multi-brand equipment basis, which allows obtaining more general results not associated with specific characteristics of a single brand or manufacturer. In time, there is no hospital's medical device brands uniformity, due to technology innovations, user preference, financial capacity, healthcare needs, among others. It was not considered necessary to distinguish between equipment manufacturers or service agreements within each category, because the treatment of the equipment and its costs do not differ especially between them [36]. Table 1 shows the distribution of equipment by category and location in hospitals.

Due to the general scope of categories, some of the analyzed equipments are mentioned:

- Monitoring: Multiparametic monitors, pulsiosimeters, ECG
- Surgery: Electrosurgical unit, surgical microscope, extracorporeal pump
- Respiratory: Ventilator, anesthesia device, CPAP
- Oftalmology: Vitreotome, yag laser, refractokeratometer
- Neonatology: Incubator, thermal cradle, phototherapy
- Neurology: Electroencephalograph, polygraph, electromyogram
- Other equipment: hyperbaric chamber, patient crane, crib heater

Some unique categories such as MRI, CT, nuclear medicine equipment (gamma camera) or radiotherapy equipment (accelerators) have been excluded from this analysis, due to the large differences in acquisition cost, technology, type and frequency of maintenance or associated complementary facilities. The analysis of these teams must be carried out separately to contemplate these particularities.

The databases come from different information systems implemented in hospitals. In all cases, the data have been obtained from cross-sectional systems that process the information in a standardized manner. This ensures that the information is comparable with each other, as it shares the same acquisition and registration criteria. The databases used in the research are shown in Table 2.

Table 3 shows the independent and dependent variables of the model, obtained from the databases above.

The selection of the independent variables associated with the resources was made through a experts panel, chosen from the engineering department of the hospitals analyzed in the sample. Delphi method principles were applied to reach consensus on the study variables, according to the methodology proposed by Okoli et al. (2004) [37]. Regarding the variables associated with patient use, those included in the annual report of each hospital, obtained through the healthcare information system, were used.

The variables associated with resources are classified into the following types: infrastructure (ARE, BED, OPR, BUA), equipment (AQV, EQA), and nursing staff (NUR). The variables

Table 1. Distribution of electromedical equipment by category and location.

Category			Location		
Name	Number	%	Service	Number	%
Monitoring	1,194	26.04%	Operating theater	1,508	32.88%
Surgery	715	15.59%	Consultations	879	19.17%
Instruments	443	9.66%	Adult ICU	334	7.28%
Breathing	381	8.31%	Rehabilitation	333	7.26%
Rehabilitation	347	7.57%	Pediatric ICU	290	6.32%
Ophthalmology	308	6.72%	Emergency	269	5.87%
Sterilization	192	4.19%	Hospitalization	267	5.82%
Rigid endoscopy	170	3.71%	Endoscopy	178	3.88%
Flexible endoscopy	130	2.83%	Maternity	116	2.53%
Neonatology	118	2.57%	Oncology	51	1.11%
Dentistry	102	2.22%	Dialysis	38	0.83%
Dialysis	47	1.02%	Diagnostic Imaging	37	0.81%
Neurology	45	0.98%	Hemodynamics	37	0.81%
Dermatology	18	0.39%	Laboratory	32	0.70%
Infusion pumps	17	0.37%	Pediatrics	23	0.50%
Other equipment	359	7.83%	Reproduction	17	0.37%
			Radiotherapy	16	0.35%
			Chemist	15	0.33%
			Pathological anatomy	11	0.24%
			Other departments	135	2.94%

Table 2. Description of the databases used in the research.

Databases	Administrator	Content	Acquisition and registration
Inventory	Purchasing and Inventory Department	Information on equipment description, location, acquisition, warranty period and type of maintenance.	The acquisitions department informs the inventory department of any new equipment. Each equipment has a unique identification number that allows each element to be related to other bases.
Failures	Electromedicine department	Information on breakdowns and the reliability of each piece of equipment.	Anyone with access to the intranet can request action on a piece of equipment using the unique identification number, relating the failure to the inventory database.
Healthcare service	Department of documentation and clinical history	Information on patients' use of different hospital services: consultations, operating theaters, diagnostic imaging equipment, hospitalization rooms.	Information is generated at different times in the patient care process. It is registered by healthcare personnel in a HIS (Hospital Information System).
Hospital	Infrastructure	Infrastructure and Projects Department	Plans, surfaces, uses, number of beds, distribution of spaces, facilities, etc.
It comes from hospital	architecture and engineering projects.		
Accounting	Accounting department	Data on the cost of maintenance of the equipment.	All invoices are recorded in the company's accounting system.
Nursing staff	Human Resources Department	Includes the number of people by categories, associated departments, seniority and cost.	Each person's work contract is coded and kept up to date with the changes.

of patient use of resources refer to healthcare services (CON, DIM, EME, ADM, SUR, AMB, STA). Moreover, maintenance variables are divided into the number of failures per year and their average time of resolution (TIM, NUM) and cost of resolution of each failure (LAB, MAT, TOT). Cost analysis is performed by specifying labor and materials.

Correlations between variables were obtained using linear regression techniques. The determination coefficients R^2 were calculated to establish the degree of relationship between the different variables. Additionally, for the multivariable linear regression models, an analysis of the variance was performed using the F-distribution, and the Student t-distribution was calculated to determine the significance of each independent variable in the different models.

An inferential statistical study was also carried out to explore the existence of interrelations between the impact of maintenance and the variables of Table 3 using variance analysis tests (ANOVA). Levene's test was applied to see whether the samples followed a normal distribution and similar variance. The following hypotheses were established in the analysis:

- Null hypothesis (H_0): The variables analyzed are not related to each other.
- Alternative hypothesis (H_1): The variables analyzed are interrelated.

The value of p was compared with the level of significance to determine whether there are statistically significant differences and assess the null hypothesis (H_0). If the *p-value* is less than or equal to the level of significance (i.e. $p \leq 0.05$), the null hypothesis can be rejected, and it could be concluded that not all population means are equal. On the contrary, if $p > 0.05$, there is not enough evidence to reject the null hypothesis.

3. Results

This section analyses correlations between variables and proposes different linear regression models. An ANOVA statistical analysis has also been carried out, and cost indicators are proposed for all hospitals. Below is a description of the outcome.

3.1. Relationship between variables

The 70 relationships to be studied arise from the combination of the 5 dependent variables and the 14 independent variables shown in Table 3. The study verified that not all of them have been adequate to justify the behavior of dependent variables since they have different levels of correlation.

The criterion used to select the regression models was that the determination coefficient (R^2) was greater than 0.80. Lower

Table 3. Description of the variables used in the research.

Independent variables		Independent variables		Dependent variables	
Associated with resources		*Associated with patient use*		*Associated with maintenance*	
Useful area of the hospital (m^2)	ARE	Consultations per year (No)	CON	Average resolution time (days)	TIM
Number of beds (No)	BED	Radiological tests per year (No)	DIM	Number of annual failures (No)	NO
Number of operating theaters (No)	OPR	Emergencies per year (No)	EME	Annual cost of materials used in the interventions (€)	MAT
Age of the building (No)	BUA	Hospital admissions per year (No)	ADM	Annual cost of the work hours of the interventions (€)	LAB
Equipment acquisition value (€)	AQV	Surgeries with hospital admission (No)	SUR	Total annual maintenance cost (€)	TOT
Age of the equipment (years)	EQA	Outpatient surgeries per year (No)	AMB		
Nursing staff (No)	NUR	Total length of hospital stays (days)	STA		

values have not been considered because the correlation between variables is considered to be weak. The value of Durbin-Watson statistics was of 1.24 and 1.36, both close to 2, implying there was no correlation between residues. Additionally, 83% of the points were within the interval [−2, 2]. Therefore, the homoscedasticity of the intervening variables is assured. The validity of the proposed reference indicators was also checked. Table 4 shows the determination coefficients (R^2) of all dependent and independent variables analyzed.

The highly correlated cost variables were total annual cost (TOT), annual labor cost of interventions (LAB) and annual cost of materials used in the interventions (MAT). The number of maintenance failures (NUM) has a relevant correlation, although with fewer variables.

The independent variables associated with the most relevant resources were the number of beds (BED), number of operating theaters (OPR), nursing resources (NUR) and the purchase value of the electromedical equipment installed (AQV). The hospital area (ARE), equipment age (EQA) and building age (BUA) variables were not considered, as they did not meet the selection criterion of R^2.

- **Number of beds (BED)**: Correlation is observed with total maintenance costs (R^2 = 0.8710), labor costs (R^2 = 0.8367) and material costs (R^2 = 0.8028). The more beds the hospital has, the more electro-medical equipment it has and therefore, the higher the costs. However, a weak correlation was observed with the number of incidents (R^2 = 0.6631).
- **Number of operating theaters (OPR)**: There is a correlation with the total maintenance costs (R^2 = 0.8354), labor costs (R^2 = 0.8001) and the cost of the materials (R^2 = 0.8003). Maintenance costs increase according to the number of operating theaters, as these are proportional to the size of the hospital and the total number of equipment. There is no correlation between the number of failures.
- **Nursing staff (NUR)**: Only the cost of materials (R^2 = 0.8349) has been correlated.
- **Value of electro-medical equipment installed (AQV)**: A high correlation with total maintenance costs (R^2 = 0.9617), labor cost (R^2 = 0.9455) and somewhat lower with material cost (R^2 = 0.8233) was observed. The equipment of higher acquisition cost has higher maintenance and a greater number of annual failures. Correlation with the number of failures (R^2 = 0.6949) is not considered.

The variables associated with the use of significant resources were number of admissions (ADM), number of surgeries with admission (SUR) and the total length of hospital stays (STA); with a weaker correlation, the number of consultations (CON), number of diagnostic imaging tests (DIM), number of emergencies (EME) and number of outpatient surgeries (AMB), all referring to the one-year period were dismissed.

- **Number of admissions (ADM)**: There is a strong correlation with total maintenance costs (R^2 = 0.8997), labor cost (R^2 = 0.8427), cost of materials (R^2 = 0.8947) and number of failures (R^2 = 0.8171). This is because the more patients attended, the more intensive is the use of electro-medical equipment and, therefore, the higher the number of breakdowns.
- **Number of surgeries with admission (SUR)**: A considerable correlation is observed with the cost of materials (R^2 = 0.9147) and the number of failures (R^2 = 0.8619). Surgical activity reflects the overall activity of the hospital, so the more surgeries, the greater the use of equipment and, therefore, the higher the number of breakdowns. A weak correlation was found with the total cost of maintenance (R^2 = 0.7529), albeit outside the chosen correlation criterion. Neither is labor cost correlated (R^2 = 0.6556).
- **Total length of hospital stays (STA)**: A high correlation was found with total maintenance costs (R^2 = 0.8581) and labor cost (R^2 = 0.8718). A longer stay results in a greater use of electro-medical equipment and, therefore, generates an increase in maintenance costs. Neither the number of failures (R^2 = 0.4762) nor the costs of materials (R^2 = 0.6363) were correlated.

3.2. Multivariable linear regression models

Several multivariable linear regression models were analyzed, given the proven high correlation between dependent and independent variables. The dependent variables selected for the multivariable regression models have been the number of incidents (NUM) and the costs in their three variants (TOT, LAB, MAT). For each proposed model, two independent variables have been selected from the resource variables (number of beds (BED), number of operating theaters (OPR), number of nursing resources (NUR) and acquisition value of equipment (AQV)) and variables of resource use (admissions (ADM), number of surgeries (SUR) and total length of hospital stay (STA)).

Of all the possible combinations of independent variables taken in pairs, six multivariable models associated with cost variables were relevant, with statistical criteria of *p-value* <0.05 for the Student-t.

Table 4. Determination coefficients (R2) of the independent and dependent variables analyzed.

	Variables associated with resources							Variables associated with use						
	ARE	BED	OPR	NUR	AQV	EQA	BUA	CON	DIM	EME	ADM	SUR	AMB	STA
TIM	0.0914	0.1040	0.0805	0.1507	0.1357	0.1990	0.0008	0.2165	0.1547	0.2876	0.1167	0.0941	0.3319	0.1534
NUM	0.3797	0.6631	0.6553	0.7147	0.6949	0.0447	0.0166	0.5376	0.4987	0.6800	0.8171	0.8619	0.5926	0.4762
MAT	0.5792	0.8028	0.8003	0.8349	0.8233	0.0025	0.0515	0.5902	0.4819	0.7866	0.8947	0.9147	0.4632	0.6363
LAB	0.7516	0.8367	0.8001	0.7112	0.9455	0.0004	0.2577	0.6498	0.5217	0.7220	0.8427	0.6556	0.2627	0.8718
TOT	0.7433	0.8710	0.8354	0.7793	0.9617	0.0000	0.2018	0.6597	0.5382	0.7759	0.8997	0.7529	0.3231	0.8581

Table 5. Statistics on multivariate cost regression models.

	Variables	Correlation percentage	R^2	Adjusted R^2	F (p-value)	Equation
Labor cost	AQV & STA	0.9854	0.9710	0.9638	134.11 (0.0001)	LAB = 0.0248 AQV + 1.43 STA (1)
	OPR & STA	0.9508	0.9039	0.8799	37.64 (0.0021)	LAB = 8822.85 OPR + 2.66 STA (2)
Cost of materials	BED & SUR	0.9762	0.9530	0.9412	81.05 (0.0003)	MAT = 139.09 BED + 7.17 SUR (3)
	AQV & SUR	0.9772	0.9549	0.9436	84.67 (0.0005)	MAT = 0.0043 AQV + 6.94 SUR (4)
Total cost	AQV & ADM	0.9912	0.9824	0.9781	223.86 (0.0015)	TOT = 0.0316 AQV + 7.26 ADM (5)
	AQV & STA	0.9929	0.9858	0.9822	276.92 (0.0011)	TOT = 0.0330 AQV + 1.82 STA (6)

Table 5 shows the regression statistics, the analysis of the ANOVA variance through the F-distribution test and the corresponding regression equations. No multivariable models of three or more independent variables were found.

These equations can determine labor, material and total costs according to infrastructure and use variables. The equations are valid for hospitals with between 20 and 200 active hospital beds.

The labor cost can be determined through the value of the equipment, combined with the total length of hospital stays and the number of operating theaters. The number of surgeries with admission combined with two infrastructure variables (hospital beds and the cost of acquiring electromedical equipment) are relevant for the cost of materials. For the calculation of total costs, the representative use variables have been the number of admissions and total length of hospital stay, combined with the acquisition cost of the electromedical equipment.

Figure 1 shows the normal probability graph for cost variables. There are, therefore, grounds to say that three types of costs follow a normal distribution.

3.3. Statistical analysis of variance

This section addresses the relationship of the mean time of resolution (TIM) with other variables of the research and offers the results from the statistical analysis of variance (ANOVA).

Hospitals with more than 8,000 m^2 have less average time to resolve failures per m^2 ($F = 12.23$; $p = 0.0054$) and less average time to resolve failures per bed ($F = 22.19$; $p = 0.0011$) than those with less than 8,000 m^2.

Hospitals with more than 100 beds require less average resolution time per m^2 ($F = 5.36$; $p = 0.0456$) and less average resolution time per bed ($F = 7.61$; $p = 0.0221$) than those with less than 100 beds. Hospitals with more than eight operating theaters have less average time to resolve failures in electromedical equipment per m^2 ($F = 5.38$; $p = 0.0456$) than those with fewer than eight operating theaters.

Hospitals with more than 25,000 days of hospital stays per year have less average failure resolution time per m^2 ($F = 7.08$; $p = 0.0260$), less average failure resolution time per bed ($F = 9.68$; $p = 0.0125$) and less average failure resolution time per operating theater ($F = 8.18$;

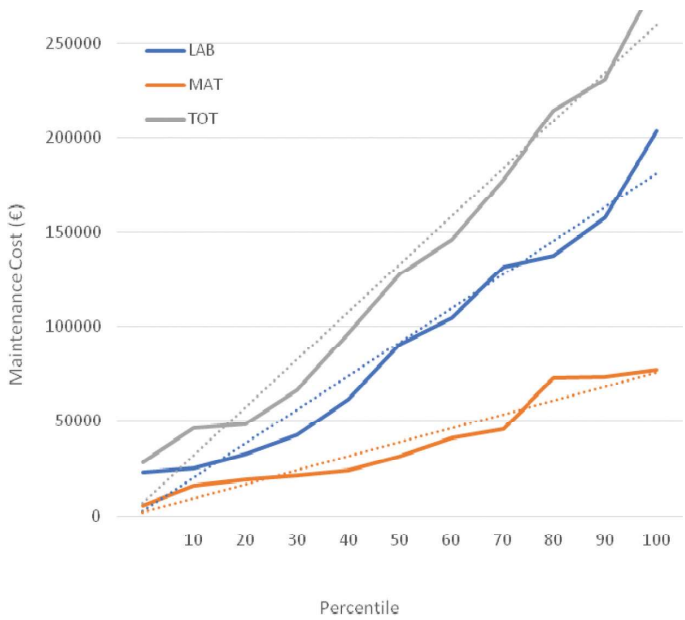


Figure 1. Normal probability graph for cost variables.

p = 0.0188) than those with less than 25,000 days of hospital stays per year, albeit with a higher total annual maintenance costs per operating theater (F = 11.56; p = 0.0079).

Hospitals with more than 50,000 emergencies per year have less average time to resolve failures per m^2 (F = 9.74; p = 0.0142) and less average time to resolve failures per bed (F = 10.56; p = 0.0117) than those with less than 50,000 emergencies per year.

Hospitals with more than 200,000 consultations per year have less average time to resolve failures per operating theater (F = 10.72; p = 0.0096), less average time to resolve failures per m^2 (F = 9.99; p = 0.0115), less average time to resolve failures per bed (F = 30.86; p = 0.0003), more breakdowns per operating theater (F = 4.17; p = 0.0714) and more annual maintenance costs per operating theater (F = 6.15; p = 0.0315) than those performing less than 200,000 consultations per year.

Table 7. Number of annual failures and maintenance costs by category.

Category	Number	% Annual maintenance cost per acquisition value	N failures/ equip
Monitoring	1,194	6,9%	0.7
Surgery	715	4,1%	0.5
Instruments	443	1,1%	0.1
Breathing	381	9,4%	0.8
Rehabilitation	347	4,9%	0.3
Ophthalmology	308	3,2%	0.1
Sterilization	192	10,6%	1.7
Rigid endoscopy	170	7,5%	1.4
Flexible endoscopy	130	3,8%	0.8
Neonatology	118	8,9%	0.9
Dentistry	102	3,3%	1.8
Dialysis	47	2,6%	1.2
Neurology	45	3,1%	0.9
Dermatology	18	2,5%	0.1
Infusion pumps	17	5,9%	1.5
Other equipment	359	2,8%	0.1

3.4. Reference indicators

Table 6 shows various indicators of electromedical equipment maintenance, obtained from the analysis of the hospitals studied in the sample.

The three types of costs have been divided by the variables of resources and use, in such a way that a cost reference is obtained for the set of 12 hospitals (and for future hospitals with similar characteristics). These values correspond to an average hospital of 10,700 m^2 with 99 beds and 8 operating theaters. Combined with linear regression models, the behavior of maintenance costs of electromedical equipment in terms of resource and use variables can thus be characterized.

The cost of materials was found to account for approximately 25% to 35% of the total cost. The rest of the cost is the labor cost of the interventions. The cost of preventive and corrective maintenance is in proportion to the costs of labor and materials. In general, preventive maintenance corresponds to labor costs and some material costs. Corrective maintenance absorbs almost the entire cost of materials and about two-thirds of the labor costs.

The study has been carried out transversally to all hospitals, with all categories being added. To complete the analysis, Table 7 shows two maintenance cost and performance indicators per category.

The N failures/equip indicator provides failure prevalence by category information for all analyzed hospitals. The annual maintenance cost percentage related to acquisition price indicator, provides information on annual maintenance cost related to acquisition price for each equipment category. These indicators can help decision making in annual maintenance budgets definition processes, supplier agreements, or equipment renovation.

4. Discussion

Most hospitals have departments specialized in acquisitions, maintenance, engineering, human resources, accounting, etc., that operate relatively independently of the healthcare activity. Each area has its processes, and they are not usually integrated, which does not mean that they are not interrelated [38]. The relationships between engineering and architecture, maintenance, acquisitions, human resources and healthcare management areas have been tested in this research.

Table 6. Reference indicators for the maintenance of electromedical equipment in a hospital.

Indicator	MAT		LAB		TOT		VAR
Annual maintenance cost per m^2	€/m^2	3.6	€/m^2	8.4	€/m^2	12.03	**ARE**
Annual maintenance cost per bed	€/bed	392	€/bed	910	€/bed	1,302	**BED**
Annual maintenance cost per operating theater	€/(Operating theater)	5,138	€/(Operating theater)	11,930	€/(Operating theater)	17,068	**OPR**
Annual maintenance cost per nursing staff	€/(Nur. staff)	334	€/(Nur. staff)	775	€/(Nur. staff)	1,109	**NUR**
Annual maintenance cost per acquisition value (x1000)	€/(Acq. value)	13	€/(Acq. value)	30	€/(Acq. value)	43	**AQV**
Annual maintenance cost per medical consultation	€/consult.	0.2	€/consult.	0.5	€/consult.	0.7	**CON**
Annual maintenance cost per diagnostic imaging	€/dim	0.5	€/dim	1.3	€/dim	1.8	**DIM**
Annual maintenance cost per emergency	€/emerg.	0.9	€/emerg.	2.1	€/emerg.	3.0	**EME**
Annual maintenance cost per admission	€/admiss.	5.9	€/admiss.	13.7	€/admiss.	19.6	**ADM**
Annual maintenance cost per surgery	€/surg.	10.6	€/surg.	24.7	€/surg.	35.3	**SUR**
Annual maintenance cost per outpatient surgery	€/(amb. surg.)	18.9	€/(amb. surg.)	43.8	€/(amb. surg.)	62.7	**AMB**
Annual maintenance cost per stay	€/stay	1.8	€/stay	4.1	€/stay	5.9	**STA**

The average resolution time has not been directly correlated with the independent variables. This is because this parameter is more related to the available resources of maintenance companies than to the hospital's infrastructure or use resources [39]. The resources that the maintainer makes available to the hospital should be sized in proportion to the demand for maintenance and have the appropriate geographical location, qualified personnel and the procedures to properly manage the electromedical equipment [40].

Even so, it has been proven that the average time ratios of failure resolution per area, bed or operating theater decreased in hospitals of more than 8,000 m^2 and/or with more than 100 beds and/or with more than 8 operating theaters and/or that perform more than 25,000 days of stay and/or 50,000 emergencies and/or 200,000 consultations. This is because the resources that the maintainer dedicates to hospitals of greater size or more intensive use are more efficient, since economies of scale come into play and several repairs can be grouped in the same workday [41]. Also, there is usually space for a repair shop in large hospitals, which, in turn, serves as a small warehouse for frequently used parts and allows shortening the action times.

It was found that the number of maintenance failures is strongly related to the use of electromedical equipment [42]. The user of the equipment can be divided into active subject (caregiver operating on the equipment) and passive subject (patient on whom the device is used). The number of hospital admissions per year and the number of surgeries with hospital admission per year are two relevant variables related to the user. In a hospital with a higher number of admissions, there is a more intensive use of equipment, which justifies more incidents per piece of equipment. As for the operating theater activity, it is a good indicator of the overall activity of the hospital, as it was found that a third of all the equipment analyzed (1,508) are in the surgical block and have a greater technology and complexity than those of other departments.

The variables related to cost (total cost, cost of labor and cost of materials) are highly correlated with the independent variables (nursing resources and purchase value of electromedical equipment) and infrastructure variables (hospital beds and operating rooms).

The number of nursing resources adequately explains the cost of materials, since these are the people who operate the electromedical equipment as active users. In more staffed hospitals, equipment operators change more frequently, and the equipment is, therefore, handled more by different people with different levels of care and with greater dilution of responsibility. Mobile equipment can also suffer added deterioration when moved.

The acquisition value of electromedical equipment is highly correlated with the three cost variables. In larger hospitals, the total purchase value of equipment increases not only by volume but also by equipment complexity and specificity. Thus, the higher the value of the equipment, the higher the value of the parts used in its repairs. Higher-valued equipment requires more specialized training of technicians and engineers and has a technology with more R&D, which implies an increase in maintenance costs [43].

The number of beds and the number of operating theaters explains the three types of cost, given that they are related to the volume of equipment of each hospital. A greater number of beds and operating theaters is an indicator of the size and possible complexity of the hospital and, therefore, of the number of pieces of equipment. In terms of patient variables (number of admissions, number of surgeries with admission and total length of hospital stays) has been highly correlated with the various costs. The number of hospital admissions is a direct measure of the use made of the equipment. The more admissions there are, the more times the devices will be used. In this case, the change of equipment from one patient to another, in general, implies more deterioration because they are handled more: configuration, adjustments and transfers.

A patient's days of stay provide a measure of the intensity of equipment use. In addition, in hospitals with short-stay admissions, the equipment is handled much more and, therefore, there is considerably more deterioration. The number of surgeries adequately explains the cost of materials, given the high density of equipment in this service and the intensive use that is made of them. The operating theater is a very demanding environment that shifts the operating pressure to the use of the equipment and, therefore, results in more breakdowns.

The cost of labor versus the cost of materials approach is appropriate because it allows the influence of human resources dedicated to maintenance to be assessed separately from the value of the materials used in the repair. The overall efficiency of maintenance is composed of multiple factors, and the separation of costs used allows analyzing the influence of factors such as training and availability of technicians, number of personnel, continuous assistance or 24/7 service, access to material suppliers, shipping logistics and delivery Times [44]. The preventive and corrective maintenance approach combines several of these factors and does not allow us to relate the causes in such a direct way. Even so, separating preventive costs from corrective ones is appropriate for defining the scope of contracts and for drawing up the annual budget [45].

The age of the electromedical equipment has not been correlated with any of the variables studied because the equipment is properly maintained according to the manufacturer's recommendations. There are preventive maintenance plans and these are not outside the end of the service period offered by the maintainer [46]. Likewise, the age of the building does not correlate with other variables, because the condition of the hospitals analyzed is adequate.

No correlations were found with the emergency department or with the diagnostic imaging service, whose type of equipment was excluded from the scope. Consultations and outpatient surgery services do not explain the behavior of dependent variables due to the lower use of equipment.

It has been verified that annual maintenance costs versus the acquisition price ration for all hospitals remain at 4.1%. Analyzing this ratio by category, the ones that have the highest annual cost compared to their purchase price are breathing equipment (9.4%), sterilization (10.6%), neonatology (8.9%) and rigid endoscopy (7.5%). The higher cost of these equipment maintenance is due to a higher intensive use. It could also be that agreements with maintenance providers are not

as optimized for these equipments and that it´s necessary to negotiate contracts with a fixed cost. In particular, it can be seen that the ratio of the number of failures per sterilized equipment is quite high (1.7) compared to the other categories, which indicates that these equipment also break down more frequently. Similarly occurs with dental equipment, with a failure rate of 1.8, but in this case the cost of repairs is not so high compared to the purchase value (3.3%). The higher maintenance cost and higher number of incidents can also be an indicator of the overuse of the equipment at the end of its service life.

A hospital system is made up of numerous healthcare processes, maintenance, support, general services, laboratory, pharmacy, among others [47]. The literature on hospital maintenance contemplates the analysis of standards, medical devices regulatory requirments, processes efficiency and decision making methodologies, but in none of these cases is an integrated or interrelated vision given [48]. The results of this study contribute to the state of knowledge in the following points:

- Maintenance variables relationship with other areas variables like the ones from healthcare delivery, architecture, procurement or human resources. The analyzed literature also does not provide cross-information with other hospital processes.
- Quantification of relationships and indicators: indicators and equations available allow obtaining reference values for maintenance costs and process efficiency estimations.
- Analysis of a large number of equipment (4,586), categories (16) and hospitals (12). The results are more general and applicable to more environments, since many of the singularities are softened. The reviewed works generally do not contemplate as many categories of equipment or hospitals simultaneously.

Results extrapolation and discussion within this study are limited to hospitals with similar characteristics. In particular, they are general privet owned and managed hospitals with specialization in some areas such as neurology, cardiology, maternity and oncology, with a size ranging from 20 to 200 beds and privately financed through insurance companies.

For those responsible for hospital management and design, accessible information on the maintenance costs of electromedical equipment is essential for making operational decision [49]. Improving maintenance in a company is considered an investment with a positive impact on product quality and availability, as well as on the productivity of the organization [50].

This research is useful for managers of hospital environments, as it can relate durability, efficiency, cost and use of electromedical equipment with healthcare information, infrastructure and resources of health personel [51]. With very few easy-to-obtain medical parameters, it is possible to dimension equipment assets, operating costs or renovation plans. Besides, healthcare performance is increased through better use and technological adaptation, as well as in the reduction of operational costs and better information for investments or renewal.

Future work should focus on determining the average life of electromedical equipment and analyzing its influence on the hospital's operating costs.

5. Conclusions

The variables selected in the research and that come from databases of non-healthcare departments are correlated with the variables of the healthcare operative nucleus. The outcome of this research has evidenced that the annual maintenance costs of electromedical equipment of a hospital and the number of breakdowns are correlated with variables of hospital infrastructure (number of beds and operating theaters), human resources (nursing staff), acquisition value of electromedical equipment, as well as other healthcare variables (number of admissions, surgical interventions and days of stay).

The resources made available to hospitals by the maintainer were found to be used more efficiently in larger hospitals and improved average response time. However, the age of the equipment, the surface area of the hospital, the age of the building, the number of consultations, diagnostic tests, emergencies and ambulatory surgeries per year were not representative.

These relationships have been quantified through a series of linear regression models, allowing costs to be estimated for other hospitals with similar socioeconomic conditions and assimilable health systems. It is thus possible to calculate the total annual maintenance cost of electromedical equipment, the necessary cost of spare materials and the cost of labor for a hospital of between 20 and 200 beds, depending on the number of admissions, the total length of hospital stay, the cost of acquiring the equipment and the number of operating theaters.

Acknowledgments

The authors would like to acknowledge HM Hospitals for the collaboration provided in the development of this study.

Declaration of interest

The authors have no relevant affiliations or financial involvement with any organization or entity with a financial interest in or financial conflict with the subject matter or materials discussed in the manuscript. This includes employment, consultancies, honoraria, stock ownership or options, expert testimony, grants or patents received or pending, or royalties.

ORCID

Justo García Sanz-Calcedo http://orcid.org/0000-0003-4449-2636

References

Papers of special note have been highlighted as either of interest (•) or of considerable interest (••) to readers.

1. McGain F, Naylor C. Environmental sustainability in hospitals – a systematic review and research agenda. J Health Serv Policy. 2014;19(4):245–252.

• **study of interest showing a review of environmental effects in hospitals.**

2. Hossain A Md., Saha U, Rahman A, et al. Clinical engineering: it's necessity, present status & future trends in Bangladesh. A case study. Int J Technol Enhancements Emerging Eng Res. 2016;4 (6):1–5.
3. Vacchiano G, Vyshka G. The use of medical devices in italy and europe: the need of a careful control policy. Int J Med Biotechnol Genetics. 2015;3(2):21–26.
4. Roig JI, Gómez A, Romero I, et al. Maintenance policies optimization of medical equipment in a health care organization. In: Advanced Methodologies and technologies in medicine and healthcare. USA: Information Resources Management Association; 2019. p. 143–157.
5. Leitgeb N. Safety of electromedical devices. Vienna: Springer; 2010.
6. Maruvada S. Overview of international electrotechnical commission technical committee 87 ultrasound organization and standards. J Acoust Soc Am. 2017;141(5):4006.
7. Aldossary S, Martin-Khan MG, Bradford NK, et al. A systematic review of the methodologies used to evaluate telemedicine service initiatives in hospital facilities. Int J Med Inform. 2017;97:171–194.
8. Capolongo S, Gola M, Di Noia M, et al., Social sustainability in healthcare facilities: a rating tool for analysing and improving social aspects in environments of care. Ann Ist Super Sanita. 52(1): 15–23. 2016.

• **study of interest showing a tool for sustainability evaluation in healthcare facilities.**

9. Thakur V, Anbanandam R. Healthcare waste management: an interpretive structural modeling approach. Int J Health Care Qual Assur. 2016;29(5):559–581.
10. Grifa RA, Pozzoli G. Electro-medical devices: environmental regulation on hazardous substances. Microchem J. 2019;148:568–572.
11. Cohen T. The cost of biomedical equipment repair and maintenance: results of a survey. Med Instrument. 1982;16(5):269–271.
12. Rosko MD. Cost efficiency of US hospitals: a stochastic frontier approach. Health Econ. 2001;10(6):539–551.
13. Herr A. Cost and technical efficiency of German hospitals: does ownership matter? Health Econ. 2008;17(9):1057–1071.
14. Migliori A. On the new regulation of medical devices in Europe. Expert Rev Med Devices. 2017;14(12):921–923.

•• **study of considerable interest showing how the medical devices regulatory framework in Europe has been updated.**

15. Migliori A. Towards a regulation of HTA in Europe: the proposal from the European Commission. Expert Rev Med Devices. 2019;16(1):1–2.
16. Imagawa K, Mizukami Y, Miyazaki S. Regulatory convergence of medical devices: a case study using ISO and IEC standards. Expert Rev Med Devices. 2018;15(7):497–504.
17. Umbelino V, Coutinho F, Fonseca I, et al. Standards about medical equipment maintenance–a survey. In 6th Portuguese Meeting on Bioengineering; IEEE; Lisbon (Portugal); 2019. p. 1–4.
18. Mendes N, Coutinho F, Farinha JT. Maintenance of electromedicine equipment: a case study based on outsourcing. In IEEE 6th Portuguese Meeting on Bioengineering; IEEE; Lisbon (Portugal); 2019. p. 1–4.
19. Özdemirci E, Yatak MO, Duran F, et al. Reliability assessments of infant incubator and the analyzer. Gazi Univ J Sci. 2014;27(4):1169–1175.
20. Daneri PA. Electromedicina: equipos de diagnóstico y cuidados intensivos. Editorial Hispano Americana HASA; Spain; 2007.
21. Picazo-Rodenas MJ. Mejora del Sistema de Mantenimiento de los equipos de Electromedicina mediante la aplicación de la Metodología RCM2 [Doctoral Thesis]. 2011.
22. Noor M, Magray I, Chawla S. Integration of healthcare system with its experts for improving the life expectancy of medical devices: a review. IJSRST. 2016;2(2):223–231.
23. Abdel-Wahed M, Sharawi A, Badawi H. Modeling of medical equipment maintenance in health care facilities to support decision making. In 5th Cairo International Biomedical Engineering Conference; Cairo (Egypt); 2010.
24. Noor M, Magray I, Chawla S. Maintenance and modelling strategies of biomedical equipment's in hospitals: a review. Adv Life Sci Technol. 2016;40:31–35.
25. Murillo WO, Mancera FMC. Characterization of the maintenance management of biomedical equipment in emergency services in clinics and hospitals in Medellin period 2008–2009. Ciencias de la Salud. 2013;11(1):35–44.
26. Orozco W, Narvaez C, Gavis LF, et al. Maintenance management in biomedical equipment in the context of the research project cleaner production in the health cluster of Medellín, Colombia. Revista Ingeniería Biomédica. 2015;9(18):15–19.
27. Mwanza BG, Mbohwa C. An assessment of the effectiveness of equipment maintenance practices in public hospitals. Procedia Manuf. 2015;4:307–314.
28. Mahfoud H, Barkany AE, Biyaali AE. Medical maintenance performance monitoring: a roadmap to efficient improvement. Int J Productivity Qual Manage. 2017;22(1):117–140.

• **study of interest showing the effectiveness of maintenance management in healthcare industry.**

29. Gonnelli V, Satta F, Frosini F, et al. Evidence-based approach to medical equipment maintenance monitoring. Embec Nbc. 2017;65:258–261.
30. González-González A, Garcia-Sanz-Calcedo J, Salgado DR. Evaluation of energy consumption in German hospitals: benchmarking in the public sector. Energies. 2018;11(9):2279.
31. Herrera-Galán M, Natasha-Walker S. Procedure to evaluate and control efficiently the operations management of medical equipment in the maintenance unit of a health institution. Ingeniería, Investigación Y Tecnología. 2018;19(1):1–10.
32. Escobar P, Del-Fresno M, Massa J, et al. XML Markup for maintenance management of critical care medical devices. In VI Congreso Argentino de Informática y Salud (CAIS)- XLIV Jornadas Argentinas de Informática e Investigación Operativa; Rosario (Argentina); 2015.
33. Carvalho-Coelho JR. Técnicas de manutenção em electromedicina: estágio no such [Doctoral Thesis]. 2017.
34. Marqués-de-Santana JM, Velozo-Santiago RL, Das-Chagas-Moura M, et al. Extended warranty of medical equipment subject to imperfect repairs: an approach based on generalized renewal process and Stackelberg game. Eksploatacja I Niezawodnosc – Maintenance and Reliability. 2018;20(4):567–578.
35. Torres-Sarango C, Loza-Hernández D. Soporte de decisión multicriterio para el mantenimiento de equipos médicos en un entorno neutrosófico lingüístico heterogéneo. Neutrosophic Comput Mach Learn. 2019;7:8–16.
36. Martelli N, Hansen P, Van den Brink H, et al. Combining multicriteria decision analysis and mini-health technology assessment: A funding decision-support tool for medical devices in a university hospital setting. J Biomed Inform. 2016;59:201–208.
37. Okoli C, Pawlowski SD. The Delphi method as a research tool: an example, design considerations and applications. Inf Manage. 2004;42:15–29.

• **study of interest showing the principles for making design choices and the guidelines for the process of selecting appropriate experts.**

38. Machmud R. Logistic management analysis of medical equipment in padang port health office. Indian J Public Health Res Dev. 2018;9 (11):602–606.
39. García-Sanz-Calcedo J, Gómez-Chaparro M. Quantitative analysis of the impact of maintenance management on the energy consumption of a hospital in Extremadura (Spain). Sustainable Cities Soc. 2017;30:217–222.
40. Silva DJA, Matos LF, Gontijo TS. A utilização de ferramentas da qualidade em uma empresa de manutenção de equipamentos eletromédicos. Revista Petra. 2015;1(2):276–292.
41. Cifrek M. Inspection and testing of electroencephalographs, electromyographs, and evoked response equipment. In: Inspection of medical devices. Singapore: Springer; 2018. p. 141–157.
42. Stroili M, Pavan E, Gorela M, et al. System for the management of the continuity of use of medical devices in hospitals. J Elect Eng. 2016;4:34–41.
43. Hossain A Md, Maryam-Sharun S, Abdur-Rashid M, et al. Necessity of clinical engineers to improve present health technology management in developing countries. Mod Appl Sci. 2015;9(12):220.

44. Alzaben H, Mccollin C, Eugene L. Maintenance planning in a Saudi Arabian hospital. Saf Reliab. 2014;25–40. DOI:10.1080/09617353.2014.11691004
45. Salah M, Osman H, Hosny O. Performance-based reliability-centered maintenance planning for hospital facilities. J Perform Constr Facil. 2017;32(1):04017113.
46. Amoore JN, Stay DG, Mather J. Scheduled inspection of electromedical equipment. Planning and assessment. J Med Eng Technol. 1995;19(6):211–218.
47. Cleven AK, Winter R, Wortmann F, et al. Process management in hospitals: an empirically grounded maturity model. Bus Res. 2014;7:191–216.
•• **study of considerable importance showing how the hospitals are investing in management process.**
48. Cleven A, Mettler T, Rohner P, et al. Healthcare quality innovation and performance through process orientation: evidence from general hospitals in Switzerland. Technol Forecasting Social Change. 2016;113(B):386–395.
49. Yousefli Z, Nasiri F, Moselhi O. Healthcare facilities maintenance management: a literature review. J Facil Manage. 2017;15(4):352–375.
50. Alrabghi A, Tiwari A. A novel approach for modelling complex maintenance systems using discrete event simulation. Reliab Eng Syst Saf. 2016;154:160–170.
51. González A, García-Sanz-Calcedo J, Salgado DR. A quantitative analysis of final energy consumption in hospitals in Spain. Sustainable Cities Soc. 2018;36:169–175.

I.3 Study of the energy intensity by built areas in a medium-sized Spanish hospital

Datos del artículo

Título en español: Estudio del consumo energético por áreas en un hospital español de tamaño medio.

Autores: Juan Aunión Villa, Miguel Gómez-Chaparro, Justo García Sanz-Calcedo.

Nombre de la revista: Energy Efficiency.

ISSN: 1570-646X.

Editorial: Springer Nature.

Área temática de la revista: Energy Efficiency.

Año de publicación: 2021.

DOI: 10.1007/s12053-021-09944-1.

Volumen: 14 (3).

Artículo: 26

Indicios de calidad

Base de Indexación: Journal Citation Report

Edición: Science Citation Index Expanded (SCIE)

Categoría: Energy & Fuels

Posición: 81 de 114.

Cuartil: Q3.

Tercil: T3

Factor de Impacto Journal Citation Report (2020): 2,574

Eigenfactor normalizado: 0.54087

Número de citas en Web of Science: 0.

Número de citas en Scopus: 1.

Número de citas en Scholar: 2.

Número de citas en Researchgate: 2.

Energy Efficiency (2021) 14:26
https://doi.org/10.1007/s12053-021-09944-1

ORIGINAL ARTICLE

Study of the energy intensity by built areas in a medium-sized Spanish hospital

Juan Aunión-Villa · Miguel Gómez-Chaparro · Justo García-Sanz-Calcedo

Received: 13 March 2020 / Accepted: 8 February 2021
© The Author(s), under exclusive licence to Springer Nature B.V. part of Springer Nature 2021

Abstract Assessing energy use in healthcare buildings requires identifying consumption profiles regularly. Keeping this in mind, this paper studies the energy intensity of a hospital and sets specific energy performance indicators by healthcare area. The authors analysed a hospital located in the province of Madrid (Spain), equipped with 182 beds and an area of usage of 25,177 m^2. The heating, ventilation and air-conditioning system (HVAC) and steam production equipment (63.0%) and medical equipment (18.8%)—which includes electromedicine (11.6%), radiology (4.2%), radiotherapy (0.7%) and nuclear medicine (2.4%)—accounted for 81.8% of the energy consumed. Throughout the analysis, the authors found that operating theatres and intensive care units demanded more than 1000 kWh/m^2 per year, while catering and nuclear medicine required between 500 and 1000 kWh/m^2 per year and radiology between 350 and 500 kWh/m^2, and most of the other units did not exceed 250 kWh/m^2. The wide variability of these results shows that each area's energy consumption should be studied separately for an appropriate energy management. These indicators are useful for benchmarking between hospitals, thus prioritising energetically efficient investments.

Keywords Energy consumption · Benchmark indicators · Healthcare engineering · Hospital projects · Energy zoning

J. Aunión-Villa
University CEU San Pablo, Madrid, Spain
e-mail: jaunion@hmhospitales.com

M. Gómez-Chaparro
HM Hospitals. Healthcare Engineering, Madrid, Spain
e-mail: mgomezchaparro@hmhospitales.com

J. García-Sanz-Calcedo (✉)
University of Extremadura, Avda. Elvas s/n, 06007 Badajoz, Spain
e-mail: jgsanz@unex.es

Introduction

Hospitals are highly complex buildings that comprise a wide range of services and functional units (Thinate et al. 2017). A prerequisite to determine the energy savings of a hospital includes an accurate calculation of the energy consumed by each of its healthcare areas and the application of individualised monitoring and control methods (Bakaimis and Papanikolaou 2017). The rapid evolution of medical technologies and equipment, combined with a constant evolution of diagnostic techniques and treatment procedures, lies behind a hospital's ever-changing energy needs. Papadopoulos (2016) analysed the historical evolution, trends and prospects of energy efficiency in hospitals, noting that it is not only a matter of technology or hardware but also of daily management policies.

Silvestro et al. (2017) analysed the internal distribution of electricity in a hospital in Genoa (Italy), by using a real-time energy monitoring system to support building and technical facility management policies, optimising energy consumption and seeking savings opportunities. Nematchoua et al. (2018) analysed the

Published online: 19 February 2021

impact that climate change produced on energy demands for heating and cooling hospitals in six cities located in different countries in the Indian Ocean. They concluded that the annual demand of energy for cooling would increase between 17.1 and 25.4% by 2030; between 34.6 and 50.2% by 2060; and between 60.8 and 95.1% by 2090.

Evaluating the energy performance of hospitals is not an easy task due to their size, energy intensity and heterogeneity and lack of energy data for a sufficiently large number of buildings for a comparative evaluation (Coccagna et al. 2018). Santamouris et al. (1994) found that the total average annual energy consumption in hospitals is 407 kWh/m^2, most of which is used for heating (73.4%).

Ahmad et al. (2016) examined some of the policies and regulations in different countries. They found that only a few addresses a need to install measurement and detection technologies in buildings. Moreover, Shen et al. (2019) studied a typical hospital in areas with hot summers and cold winters. They presented a plan to improve the hospital system in combination with its operating conditions, although they did not consider the energy consumption from its hospital areas.

Christiansen et al. (2016) studied the relationship between operation time and energy consumption of a hospital and, then, evaluated more than 20,000 h of measured data for operating theatres, intensive care units and examination and treatment rooms, as well as large-scale medical equipment. They did not appreciate significant differences between weekdays and weekends in intensive care units, although operating theatres showed surprisingly strong similarities to regular "office hours". However, they did not analyse the consumption in the remaining hospital areas. Christiansen et al. (2016) also carried out a time analysis of consumption and use of electrical energy of hospital departments and large-scale medical equipment from a perspective to use the electrical network, although their study did not reveal the total annual thermal energy consumed.

Hu et al. (2004) analysed the electricity consumption of an acute care hospital in Taipei (China) and found that the energy intensity in the surgical area was approximately three times that of the rest of the hospital, although they did not determine the energy intensity for other areas in the hospital or take into account thermal energy.

Morgenstern et al. (2016) quantified the electricity use of various types of departments in 8 hospitals in England through on-site measurements. They found that the different departments presented varied electricity consumption characteristics, without considering thermal energy consumption or HVAC systems.

Christiansen et al. (2015) analysed the energy demand in medical laboratories of the University Medical Centre of Hamburg (Germany) and determined that refrigerators and freezers represented more than 60% of the total electric load consumption, while incubators and air extractors accounted for 20% approximately.

None of the above authors analysed thermal or electrical energy consumption by healthcare area of a hospital. Therefore, there are no reference indicators of energy consumption to differentiate the demand for each hospital area. Instead, there are only average consumption data for the building, which does not allow for the application of efficient energy-saving measures.

This paper aims to study the energy intensity of a hospital by areas and to establish energy performance indicators. This research will be useful to facilitate technical decisions for hospital energy managers and to detect the existence of energy-hungry areas. In addition, the hospital's financial management will be able to use these results to distribute the cost of energy supplies among the different departments, allocating them to each medical test, and to reward or penalise the most efficient services.

Materials and methods

The hospital under study is located in Móstoles (Spain). It holds 182 beds and includes a useful surface area of 25,177 m^2. The hospital was designed in 2011, built between 2012 and 2014 and started operations in 2015. A total of 509 workers are employed in the facilities, including orderlies, nursing assistants, nurses, doctors, managers, administrators and maintenance, cleaning, cafeteria, kitchen, pharmacy and laboratory personnel, among others.

Hospital description

The hospital provides most of the currently recognised medical and surgical specialities (Spanish Ministry of Health, Social Services and Equality 2018). It has a surgical block with 11 operating theatres, including three operating/delivery rooms, a haemodynamic room, a medical-surgical day hospital, an oncological day hospital, maternal hospitalisation areas - obstetrics, psychiatric

and an intensive care unit (ICU), adult and paediatric emergencies, outpatient areas, laboratory service (clinical analyses, transfusion service and blood donation unit, pathological anatomy, cryopreservation of stem cells) and hospital pharmacy, among others. Figure 1 shows a 3D graph showing the building architecture.

The roof includes thermal insulation with 8 cm of rigid extruded polystyrene (0.30 W/m^{2}K). The terraces at ground floor level are insulated under the floor structure (0.63 W/m^{2}K). The value of thermal transmittance of the floor structure between floors is 0.26 W/m^{2}K. The ventilated facade of the building is formed by half a foot of solid brick, with an external panel made up of aluminium-magnesium alloy and a thermoplastic resin. The interior is made with plasterboards. Rockwool insulation is externally on the half foot of brick (0.25 W/m^{2}K). On the semi-basement level, the facade is formed by half a foot of perforated brick, internally insulated with glass wool (0.26 W/m^{2}K). Partition walls are made with plasterboards of different types (0.86 W/m^{2}K). The window frames are made of lacquered aluminium with double glazing with internal chamber and thermal break. The average thickness of the aluminium profiles is 1.5 mm (2.11 W/m^{2}K). They have 6 mm external glass, a dehydrated chamber with a 20 mm chamber filled with argon and 4 mm thick internal glass (1.10 W/m^{2}K).

Methodology

Nineteen fixed network analysers (Power Logic PM 710) were installed, as detailed in Table 1, to study the operation of the electrical installations. This equipment was verified 5 years after its installation by an accredited company, with a guarantee of less than 1% of error in all cases. Specific measurements of the lighting circuits were made to differentiate which electricity consumption belonged to the lighting system and which to electromedicine. Additionally, the annual consumption was estimated based on the hours of operation, using a clamp ammeter. The electricity consumption of the cold production plant was made independently using a network analyser.

The hospital's engineering department collected data on electricity and natural gas monthly between 2015 and 2019, using data from the utility companies' bills. They analysed the data to detect abnormal deviations, compare indicators with other healthcare centres and verify that the kWh price of energy was as contracted. The average price between 2016 and 2018 was 0.109 euros/kWh for electricity and 0.044 euros/kWh for natural gas, including all the items in the bill except VAT. The agreed price for electricity fluctuated according to the value of the energy on the wholesale market. Specifically, the price fluctuated between 0.128 and 0.073 euros/kWh in the years analysed.

To produce cooling water, the hospital uses 3 water chillers with screw compressors and air condensation, each with an electrical power of 267 kW and an energy efficiency ratio (EER) of 3.15, located on the roof of the building. In the semi-basement plant, there are four-pipe natural gas condensing boilers, working at two different temperatures, with a thermal power of 510 kW each and 97.5% yield, which are used for heating and domestic hot water (DHW). In addition, there is a natural gas steam generator with a 603 kg/h steam capacity, 407 kW heat output and 88% efficiency, which is used for air humidification and sterilisation of surgical instruments used in operating rooms.

The air handling units include hot and cold water coils and a steam lance used to adjust the relative humidity. These units regulate the air in operating rooms, ICU, kitchen, cafeteria, emergency department, waiting rooms and corridors, among others. There are 57 air handling units in total, distributed throughout the different floors of the hospital. In some areas—including offices, medical consultations and hospitalisation

Fig. 1 Building architecture

Table 1 List of measurement equipment used

Equipment used	Measured area	Equipment used	Measured area
Energy metre	Domestic hot water	Network analyser	Transformer 3
Energy metre	Solar panels hot water	Network analyser	Generator set
Energy metre	General air handling units hot water	Network analyser	Top floor HVAC system
Energy metre	Operating theatres air handling units hot water	Network analyser	Ground floor HVAC system
Energy metre	Semi-basement fan coils hot water	Network analyser	Semi-basement HVAC system
Energy metre	Ground floor fan coils hot water	Network analyser	Second floor
Energy metre	Rooms fan coils hot water	Network analyser	First floor
Energy metre	Building R&D hot water	Network analyser	Ground floor
Energy metre	TAC-MRI cold water exchangers	Network analyser	Semi-basement
Energy metre	General air handling unit cold water	Network analyser	Lifts
Energy metre	Operating theatre air handling unit cold water	Network analyser	Kitchen
Energy metre	Semi-basement fan coils cold water	Network analyser	Nuclear Medicine
Energy metre	Ground floor fan coils cold water	Network analyser	Radiology 1
Energy metre	Rooms fan coils cold water	Network analyser	Radiology 2
Energy metre	Building R&D cold water	Network analyser	Radiotherapy
Network analyser	Transformer electricity 1	Network analyser	UPS surgical use
Network analyser	Transformer electricity 2	Network analyser	UPS non-surgical use

rooms—there are also fan coils available, which allows individual temperature control.

Hot and cold water is distributed from the production plants to the air handling units through general and surgical circuits. The fan coils distribution takes place through 3 circuits: one for the fan coils located in the basement, another for those on the ground floor and the last one for those located in the patient rooms. All these consumption points operate on four tubes, so that you can heat or cool simultaneously as needed. There are also 2 circuits to produce DHW and for its accumulation in 4 tanks, 4000 l each, located in the heating plant and in the solar thermal energy plant.

Also, 15 thermal energy metres (Kamstrup Multical 602) were installed in different areas of the building, as detailed in Table 1, to study the operation of the HVAC and DHW networks. A natural gas metre was used to differentiate which part of natural gas consumed in the hospital corresponded to the steam generator. An external temperature sensor was also installed and used to monitor the start-up and shutdown of certain HVAC system and to monitor its operating status.

The energy consumption for the HVAC system by healthcare areas was distributed considering the surface area it supplies, the programmed hours of operation and the power of the fans in each of the air handling units installed in the hospital. Information from thermal energy metres was also used. All the metres installed were integrated into a building management system (Shaikh et al. 2018), which controls all the parameters of the HVAC and lighting systems as well as their operating hours. Every 5 min, these data were registered automatically and stored on the computer servers. The control system was also programmed to send a monthly reading report of the metres to the Engineering Department, responsible to analyse the data, check the effectiveness of the implemented energy-saving measures and justify any anomalies found in the system.

The emission factor of the electricity mix is 0.43 kg of CO_2/kWh, and that of natural gas is 0.202 kg of CO_2/kWh (Spanish Ministry of Agriculture 2018). The calculation of heating and cooling degrees days was obtained from BizEE Software (2020).

Results

Energy review

Figure 2 shows the distribution of average energy consumption in the hospital between 2017 and 2019, differentiated by type of facility.

It was found that HVAC system and steam production (including that needed to sterilise surgical instruments), which was 63%, and medical equipment, 18.8%, consumed 81.8% of the overall energy. This equipment includes electromedicine (11.6%), radiology (4.2%), radiotherapy (0.7%) and nuclear medicine (2.4%). The authors also observed that the lifts consumed 26,045 kWh/year (0.35%), the medical gas plant 35,186 kWh/year (0.47%), the water pressure group 4599 kWh/year (0.06%) and the pneumatic transport system 2774 kWh (0.03%).

Moreover, 85.61% of the natural gas consumed by the HVAC system was used in general air handling units (58.97%), operating theatre air handling units (14.81%) and patient room fan coils (13.89%). Figure 3 shows monthly average energy consumption in the hospital between 2017 and 2019.

Apart from the HVAC systems, the electricity consumption remained constant throughout the year. With respect to natural gas, there were significant variations among the different months; specifically, in January, the consumption was 57.95% over the average, while in September, the consumption was 50.09% below the average.

Energy consumption by healthcare areas

Table 2 shows the average annual energy consumption by each technical service in the main areas of the hospital, expressed in kWh.

The average annual energy demand for DHW, HVAC system and lighting were 164.6 kWh/m^2, presenting a standard deviation of 13.34 kWh/m^2. Table 3 shows the average annual consumption of electrical and thermal energy by healthcare area and surface unit.

Figure 4 shows the average energy consumption and carbon dioxide emissions by healthcare area. 80.33% of energy was consumed in the operating theatres and ICUs (27.96%), hospitalisation (17.80%), consultations (11.52%), catering (10.58%), radiology (6.49%) and common areas (5.98%). Moreover, 78.99% of carbon dioxide emissions were due to energy consumption in operating theatres and ICUs (24.30%), hospitalisation

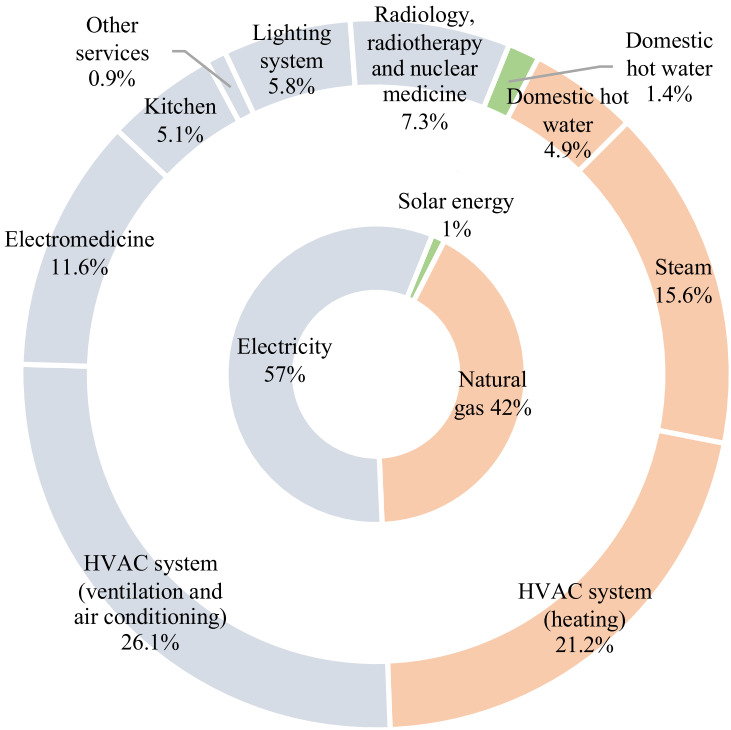


Fig. 2 Average energy consumption between 2017 and 2019

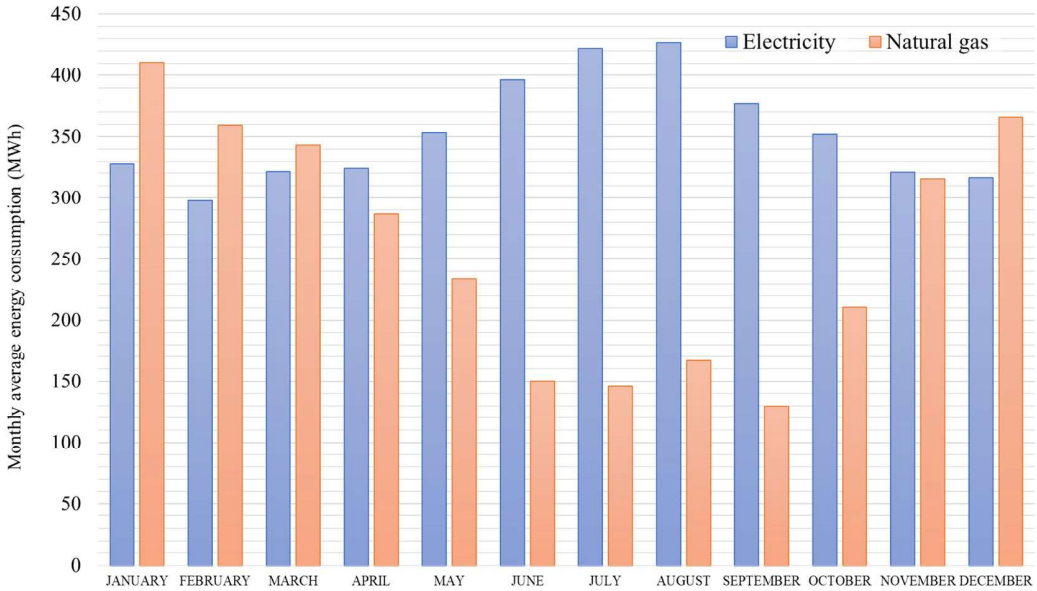


Fig. 3 Monthly average energy consumption between 2017 and 2019

(17.27%), consultations (11.91%), catering (11.72%), radiology (7.99%) and common areas (5.80%).

Figure 5 shows the average annual consumption of heating and cooling by healthcare area.

Table 2 Average annual energy consumption by healthcare area (kWh per year)

Hospital area	DHW	Steam production	HVAC	Medical equipment	Kitchen	Lighting	Other uses
Operating theatres and ICU	19,873	775,239	1,165,679	89,598	0	31,054	4901
Hospitalisation	238,249	97,499	590,793	286,629	0	99,343	15,678
Radiology	14,225	9878	59,858	374,404	0	22,229	3,508
Nuclear medicine	4109	7601	46,056	198,097	0	6421	1013
Radiotherapy	7140	14,633	88,666	84,874	0	11,158	1761
Administration and management	7598	3573	21,652	34,258	0	11,873	1874
Consultations	42,191	78,033	472,842	190,222	0	65,929	10,405
Research	14,297	41,397	250,845	64,460	0	22,341	3526
Teaching	8656	10,907	66,092	0	0	13,527	2135
Common areas	61,094	38.886	235,630	0	0	95,467	15,066
Pharmacy	1597	3277	19,856	7201	0	2496	394
Catering	35,737	50,091	303,528	0	378,359	18,912	2985
Rehabilitation gymnasium	3098	1971	11,941	13,968	0	4841	764
Laboratories: clinical analysis and pathological anatomy	6062	11,089	67,195	27,332	0	9473	1495
Emergency room	7830	19,064	115,520	35,301	0	12,235	1931
Chapel and mortuary	3259	1411	8552	0	0	5093	804
Storage	1482	1154	6994	0	0	2316	365
Total	476,499	1,165,705	3,531,700	1,406,345	378,359	434,708	68,603

Table 3 Performance indicators per healthcare area and unit of area

Hospital area	Code	Electricity		Thermal energy		Total			
		kWh/m^2	kg CO_2/m^2	kWh/m^2	kg CO_2/m^2	kWh/m^2	% kWh	kg CO_2/m^2	% kWh
Operating theatres and ICU	SUR	427.0	183.6	733.0	129.2	1160.0	28.0	331.2	28.7
Hospitalisation	HOS	126.4	54.3	104.4	19.2	230.8	17.8	73.6	17.3
Radiology	RAD	336.4	144.7	39.6	7.5	376.0	6.5	152.2	8.0
Nuclear medicine	NME	620.9	267.0	87.1	17.1	708.0	3.5	284.1	4.3
Radiotherapy	RTHR	226.9	97.6	95.3	18.7	322.2	2.8	116.3	3.1
Administration and management	MAA	87.2	37.5	30.4	5.6	117.6	1.1	43.1	1.2
Consultations	CON	138.1	59.4	87.1	9.9	225.1	11.5	76.4	7.5
Research	INV	176.6	76.0	130.1	25.8	306.7	5.3	101.7	5.4
Teaching	TEA	66.5	29.6	62.8	12.2	129.3	1.4	40.8	1.3
Common areas	SHA	43.5	18.7	37.2	7.0	80.7	6.0	25.7	5.8
Pharmacy	PHA	145.5	62.6	95.4	18.8	240.9	0.5	81.3	0.5
Catering	CAT	518.1	222.8	202.7	39.5	720.9	10.6	262.3	11.7
Rehabilitation gymnasium	REH	93.3	40.1	37.2	7.0	130.5	0.5	47.1	0.5
Laboratories: clinical analysis and pathological anatomy	LAB	137.3	59.0	86.2	16.9	223.5	1.6	76.0	1.7
Emergency room	EME	159.6	68.6	111.1	21.9	270.8	2.6	90.6	2.6
Chapel and mortuary	CAM	36.0	15.5	28.8	5.3	64.8	0.3	20.8	0.3
Storage	STO	48.7	20.9	43.1	8.2	91.8	0.2	29.1	0.2
Total	TOT	168.2	72.3	128.2	25.0	296.4	100	97.3	100

The radiology area accounts for 9.4% of the total demand for hospital cooling and 1.7% for heating. The demand for cooling in the area of nuclear medicine was 9.2% and 1.3% for heating. Radiation therapy demanded 18.4% for cooling and 2.4% for heating. The hospitalisation area demanded 11.8% for cooling and 29.8% for heating. The remaining areas demanded similar amounts for cooling as they did for heating. In

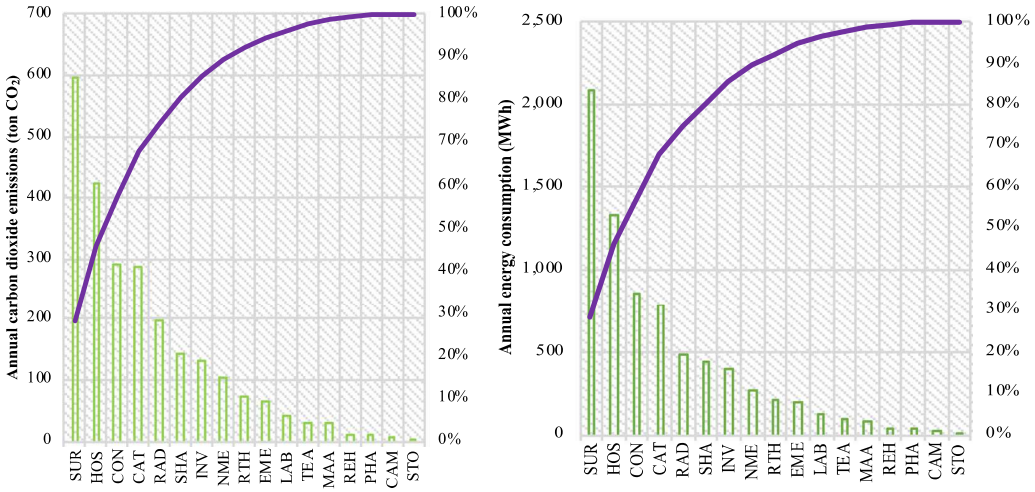


Fig. 4. Annual average energy consumption (right) and carbon dioxide emissions (left), in the period 2017-2019 by healthcare area

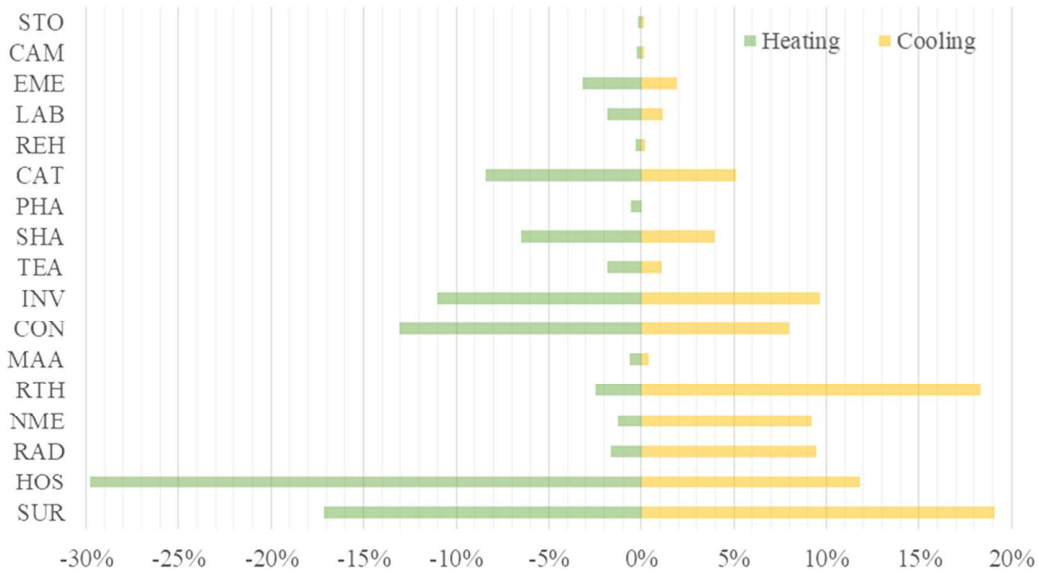


Fig. 5 Average annual consumption of heating and cooling between 2017 and 2019 by healthcare area

absolute terms, the demand for heating was 224.61% higher than the demand for cooling. The average outside temperature in the period analysed was 20.4°C.

Zoning of energy intensity

Figure 6 shows the floor plan of the semi-basement level of the hospital, on which the different healthcare areas have been shaded according to their annual energy consumption.

The areas of nuclear medicine, radiology and radiation oncology demanded 708, 376 and 322 kWh/m^2/year, respectively, due to the energy-hungry equipment they hold, especially PET-RMI, MRI, CAT and linear accelerator, among others. The high energy demand of the research area (307 kWh/m^2/year) is justified by the existence of operating theatres with high environmental conditions requirements and, therefore, high ventilation consumption. The emergency department demanded 271 kWh/m^2 per year for its continuous use, which translates into high HVAC system needs. Dainese et al. (2019) found possible energy-saving avenues with controlled ventilation rates and lighting according to the occupancy.

Annually, the hospital pharmacy service demanded 241 kWh/m^2 of energy. Several hospital areas showed similar energy demand, including consultations, blood donation unit, dentistry, oncology outpatient hospital and in vitro fertilisation unit. The laboratory demanded 223 kWh/m^2, the rehabilitation area 131 kWh/m^2 and the warehouse 92 kWh/m^2. The changing rooms, archives, waste area, corridors, staircases, maintenance rooms and the areas dedicated to housing the technical facilities such as general low voltage electrical panel, transformation centre, boiler room, medical gas plant, water pressure consumption group and water pressure firefighting group consumed an average of 81 kWh/m^2 per year each.

Figure 7 shows a floor plan of the ground floor of the hospital, revealing the cafeteria's high annual energy demand (721 kWh/m^2), which is because it was analysed together with the kitchen forming the catering area. The kitchen and cafeteria demanded 518 kWh/m^2 per year of electricity, especially for the conservation and freezing chambers for perishable products; the equipment used to cook food such as ovens, kettles, fryers and temperature chillers, among others; and the ventilation of the spaces. The authors also found that 203 kWh/m^2 of natural gas was consumed per year for heating due to the high number of weekly operating hours.

The authors also found that the annual energy demand of the psychiatric area is 231 kWh/m^2. The consultation area required 225 kWh/m^2 per year, while the admission area, assembly hall, administration and management demanded an annual average of 118 kWh/m^2.

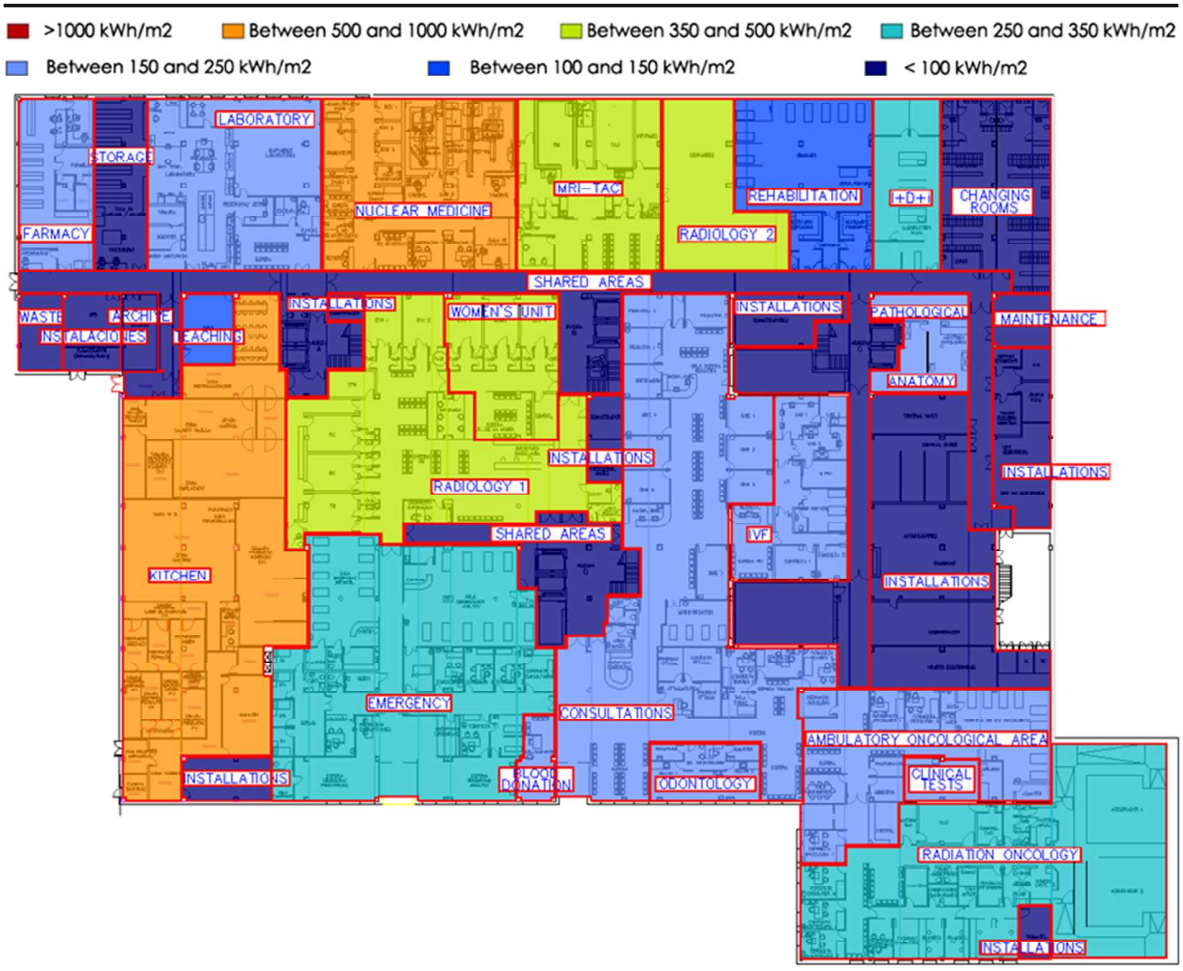


Fig. 6 Semi-basement level of the hospital

The shop, corridors, stairs and areas where the technical installations are located such as air processing units and secondary electrical panels, among others, are part of the common area that demanded an average of 81 kWh/m^2/year.

Figure 8 shows a plan of the first floor of the hospital, revealing that the hospitalisation area demanded an average of 231 kWh/m^2 per year. There is an opposing trend between glazing specifications that allow maximum energy savings in heating and cooling of patient rooms (Cesari et al. 2018). The authors observed that the teaching area did not demand much energy (129 kWh/m^2/year), which is entirely justified because its use is intermittent due to holiday periods.

Figure 9 shows a plan of the second floor of the hospital where the surgical area along with the intensive care units was the most energy-consuming areas (1160 kWh/m^2 per year on average) due to the high needs for HVAC and the use of steam sterilisers. Simulation results obtained with a model revealed that the average thermal energy demand of the surgical area is 1021 kWh/m^2 per year, whereas the average thermal energy demand is 1685 kWh/m^2 per year for the operating theatre (González Gil et al. 2018). Sanchez-Barroso and García-Sanz-Calcedo (2019) found potential thermal energy savings of up to 55.67% by installing a sensitive heat recovery unit and recirculating 50% of the airflow taken from the operating theatre. The energy needs were not so high in the outpatient hospitals and the sleep unit, which demanded 225 kWh/m^2 on average per year, the hospitalisation area 231 kWh/m^2 per year, the corridor, stairs and areas where the technical facilities are located 81 kWh/m^2.

Fig. 7 Annual energy consumption on the ground floor of the hospital

Discussion

It has become clear that a hospital is a very complex building from an energetic point of view. Therefore, the energy demand in each of the spaces that make up a hospital should be analysed in depth. The usage of graphs allows to quickly identify those areas that require energy-saving attention.

Diagnostic imaging equipment (MRI, CT and PET) consumes large amount of electricity, so the cost of energy should be included in each test performed on a patient, as noted by Jakka and Rossbach (2013). Although the latest technologies include energy-saving modes when a certain amount of time passes without use, most of this equipment must be available for use without interruption. For example, the CT in-hospital energy related to idle periods (without patients) is 14 to 30 times higher than the active energy of the CT image (Esmaeili et al. 2015). In addition, they release a lot of heat in their operation, so the rooms in which patients are diagnosed have higher cooling needs and lower heating requirements (García-Sanz-Calcedo et al. 2019).

The building control system is of great importance (Lee and Cheng 2016), and access to this system should be granted to as few users as possible. The operation of the HVAC and DHW installations must also be optimised in their production, distribution and final consumption stages and be the exclusive responsibility of the hospital's energy manager. The operating hours of the equipment must be continuously adjusted and reviewed system-wide once a year. Consideration should also be given to the potential of energy-saving initiatives based on raising awareness on energy issues among workers and users, for example, through

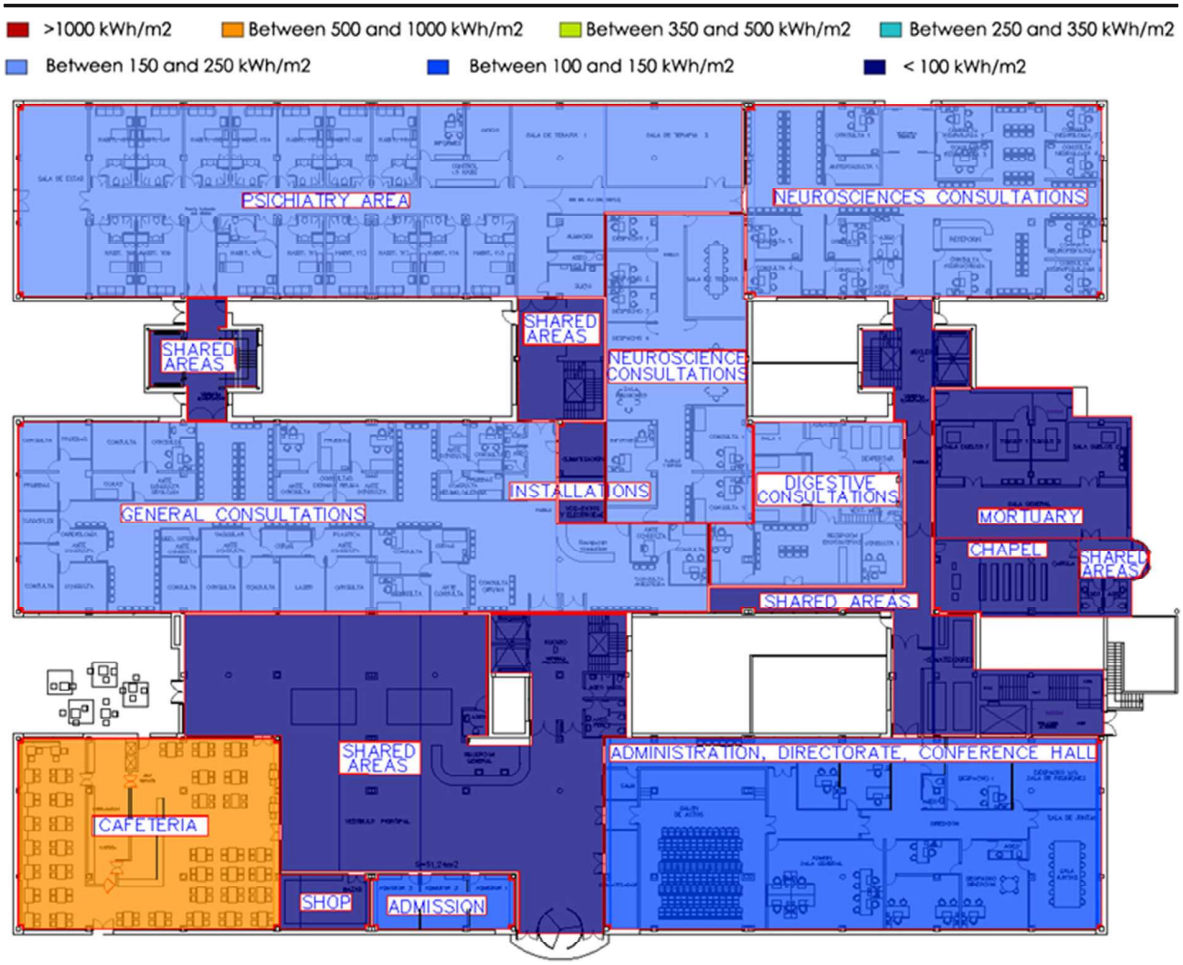


Fig. 8 Annual energy consumption on the first floor of the hospital

awareness-raising campaigns. Maintenance management should also be reviewed to eliminate unnecessary energy consumption (Gómez-Chaparro et al. 2020), and DHW consumption should always be analysed in relation to cold water for human consumption (García-Sanz-Calcedo et al. 2018).

To date, there have not been many studies attempting to reconcile the requirements of thermal conditions of different types of occupants in a hospital room (Khodakarami and Nasrollahi 2012). Khalid et al. (2019) found that thermal comfort can be improved, and energy can be saved by adjusting the temperature in rooms with patients (Zazzini et al. 2018). It is important to bear in mind that the thermal requirements of the staff working in hospitals are quite different from that of employees in typical office spaces (Derksa et al. 2018).

It should be considered that those savings strategies implemented in a hospital could influence the well-being and comfort of users (Al horr et al. 2016). Inadequate lighting levels might affect medical diagnosis, and insufficient ventilation might increase infection levels. In any case, it is necessary to analyse the economic and environmental feasibility in realising long-term renovation strategies for existing buildings (Zuhaib and Goggins 2019).

In this research study, different energy-saving measures were applied, including changing the operating hours during holiday periods, installing an ambient CO_2 probe to calculate the proportion of outside air used in the ventilation of different areas, automating the switching on and off of HVAC pumps according to the outside temperature, establishing systematic reviews of the control system to detect malfunctions in the HVAC equipment and reducing the air change rate per

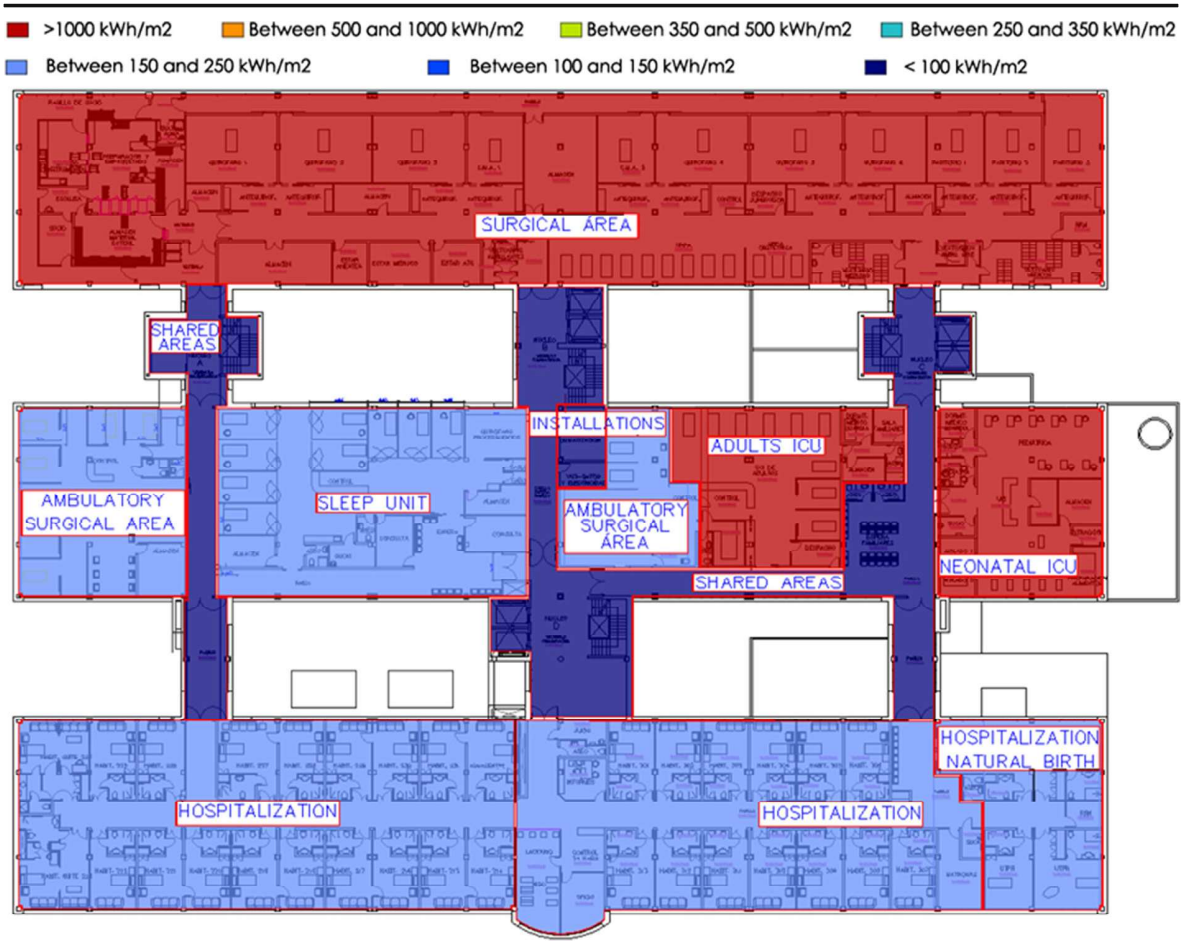


Fig. 9 Annual energy consumption on the second floor of the hospital

hour at nights in areas where occupation decreases at night, among others. It estimated an energy annual savings of 338,645 kWh of electricity and 438,753 kWh of natural gas, adding up to an economic annual savings of 56,562 €. The resources invested amounted to 53,500 €, so the payback period of the investment was less than 1 year. Also, the hospital has been able to certify its energy management system according to Aenor (2018). However, periodic audits are advisable for efficient energy management (Alajmi 2012; Annunziata et al. 2014; Krarti 2020; Yilmazoglu 2017). In Table 4, some benchmark indicators related to hospital energy consumption are shown.

Moghimi et al. (2014) estimated the average annual energy consumption in a hospital in Malaysia at 384 kWh/m^2. Bawaneh et al. (2019) analysed the energy consumption in hospitals in the USA finding that it was 640.7 kWh/m^2 in very hot areas and 781.1 kWh/m^2 in very cold areas, with an average of 738.5 kWh/m^2. San-José et al. (2009) computed the average annual energy consumption for 300-bed small-sized public hospitals in Spain as 8885 kWh/bed and for those exceeding 300 beds as 10,043 kWh/bed. On the other hand, Mínguez-Gómez (2017) determined that the average energy consumption of a public hospital with less than 250 beds was 14,271 kWh/bed, and those with more than 250 beds was 17,288 kWh/ bed.

On the other hand, García-Sanz-Calcedo et al. (2019) showed that annual energy consumption in a private hospital was 0.30 MWh per m^2 and 26.40 MWh per bed. However, these authors determined that it is not appropriate in a private hospital to use indicator usually utilised in public hospitals (kWh per bed). González et al. (2018) analysed the energy consumption in 23 public hospitals in Germany finding that it was 270 kWh/m^2, 14,370 kWh/worker and 23,410 kWh/bed.

Table 4 Benchmark indicators related to hospital energy consumption

Index	Unit	Electricity	Thermal energy	Total
Annual energy demand per bed	kWh/bed	23,266	17,733	40,999
Annual energy demand per number of hospital discharges	kWh/N discharges	469	346	827
Annual energy demanded by DHW, HVAC and lighting, per m^2 of usable floor area	kWh/m^2	94.6	81.9	176.5
Annual energy demand per m^2 of usable floor area	kWh/m^2	168	128	296
Annual energy demand per heating degrees days	kWh/HDD	-----	1 073	-----
Annual energy demand per cooling degrees days	kWh/CDD	8 410	-----	-----

The selection of the filtration system for air handling units and their energy efficiency (Aenor 2012), as well as the need to change the filter at the end of its useful life, is a critical decision since over-pressurising the filter can cause the cost of energy in the fan to exceed the cost of changing the filter and render it not profitable (Caesar 2008; Pastor-Pérez 2019). To reduce CO_2 emissions, the authors propose installing photovoltaic solar energy and purchase the electricity from a marketer that is part of the Guarantee of Origin and Electricity Labelling system.

It is essential that from an energy design point of view, the surgical area and ICU are located close to the air handling units to minimise energy losses in the distribution (Balali and Valipour 2020). This is possible since it only requires that a technical zone be allocated next to these areas. For the same reason, there should be hot and cold water production plants nearby, although safety measures should be taken as these are premises and areas of particular risk for fire protection.

In the design or renovation phase of a hospital, the healthcare areas that will be served by the same HVAC equipment must be carefully selected and grouped (Teke and Timur 2014). For example, a medical consultation area should not be grouped with a surgical area because the equipment cannot be shut off with the energetic waste that this entails. More than one piece of equipment should also be installed in areas that have a lot of surface area and that are usually partially closed when the demand for care decreases, such as the hospitalisation area. The surgical area and ICU should be located close to the air handling units to minimise energy losses in the distribution. For the same reason, they should also have hot and cold water production plants nearby.

Special measures should be applied in more energy-consuming areas. For example, the insulation of the enclosure in surgical areas and ICUs should be reinforced to reduce the cost of HVAC. Measures that benefit the acquisition of more energy-efficient equipment in the hospitality, radiology and nuclear medicine services could be included. The use of medical equipment that has energy management functions and allows for automatic shutdown after a period of inactivity could also be considered (Rohde and Martinez 2015). In this respect, the authors found that only a portion of the equipment had a "standby" mode.

This research will be useful to facilitate decision-making for hospital energy managers, as the proportions found enable detecting unusual situations. Also, the hospital's financial management will be able to use the results obtained to distribute the cost of energy supplies among the different departments and allocate them to each medical test. In addition, it will also be useful to reduce CO_2 emissions into the atmosphere and may become an increasingly important part of carbon reduction strategies in hospitals in the future (Morgenstern et al. 2016).

Future work should aim to expand the number of hospitals in the sample and to compare HVAC consumption in hospitals located in other geographical areas. The energy consumption of high-tech equipment used in hospitals should also be analysed in depth.

Conclusions

The energy behaviour in a hospital, keeping in mind each of its healthcare areas, was analysed. The authors found that 81.8% of the energy was consumed by the HVAC systems and steam production equipment. The medical equipment used 18.8% of the energy, including electromedicine (11.6%), radiology (4.2%), radiotherapy (0.7%) and nuclear medicine (2.4%). Other energy

consumptions included lifts (0.35%), medical gas plant (0.47%), water pressure group (0.06%) and pneumatic transport system (0.03%), among others.

The results showed that operating rooms, adult ICUs and neonatal ICUs demanded more than 1000 kWh/m^2 of energy per year. The cafeteria and nuclear medicine areas demanded each between 500 and 1000 kWh/m^2 per year. Radiology used between 350 and 500 kWh/m^2 per year. The annual energy demand was similar in the emergency, R&D and radiotherapy areas; each demanded between 250 and 350 kWh/m^2 per year. The authors found that the areas of consultation, hospitalisation, pharmacy, laboratories, rehabilitation gymnasium, teaching, administration, warehouse, waiting rooms, chapel and mortuary added up to less than 250 kWh/m^2 per year. The results are consistent with hospitals between 20,000 and 30,000 m^2 of useful surface area. The results have been contrasted with three additional hospitals of similar size and characteristics, proving that the deviation of the results is less than 7%.

Due to the great difference found between the areas of a hospital, it is necessary to study adequately its energy consumption, analysing each of its areas individually to optimise the energy efficiency of the hospital. Particularly, special attention should be given to operating rooms, ICUs, catering and nuclear medicine.

Funding The authors wish to acknowledge to European Regional Development Fund for the financial support provided through Research Projects GR18029 linked to the VI Regional Plan for Research, Technical Development and Innovation from the Regional Government of Extremadura (2017-2020).

Declarations

Conflict of interest The authors declare no competing interests.

References

AENOR. UNE EN 779. (2012). Particulate air filters for general ventilation; requirements, testing, marking. Madrid.

AENOR. UNE EN ISO 50001. (2018). Energy management systems. Requirements with guidance for use. Madrid.

Ahmad, M. W., Mourshed, M., Mundow, D., Sisinni, M., & Rezgui, Y. (2016). Building energy metering and environmental monitoring – A state-of-the-art review and directions for future research. *Energy and Buildings, 120*, 85–102.

Alajmi, A. (2012). Energy audit of an educational building in a hot summer climate. *Energy and Buildings, 47*, 122–130.

Al horr, Y., Arif, M., Katafygiotou, M., Mazroei, A., Kaushik, A., & Elsarrag, E. (2016). Impact of indoor environmental quality on occupant well-being and comfort: A review of the literature. *International Journal of Sustainable Built Environment, 5*, 1–11.

Annunziata, E., Rizzi, F., & Frey, M. (2014). Enhancing energy efficiency in public buildings: The role of local energy audit programmes. *Energy Policy, 69*, 364–373.

Bakaimis, B., & Papanikolaou, I. (2017). Electrical energy saving policies, initiatives, results, challenges and lessons learned for the Grevena Hospital. *Procedia Environmental Sciences, 38*, 882–889.

Balali, A., & Valipour, A. (2020). Prioritization of passive measures for energy optimization designing of sustainable hospitals and health centres. *Journal of Building Engineering, 2020*, 101992.

Bawaneh, K., Nezami, F. G., Rasheduzzaman, M., & Deken, B. (2019). Energy consumption analysis and characterization of healthcare facilities in the United States. *Energies, 12*, 3775.

BizEE Software (2020). https://www.degreedays.net. [].

Caesar, T. (2008). *Air filter classification in the light of rising energy costs*. Germany: Freudenberg Filtration Technologies KG.

Cesari, S., Valdiserri, P., Coccagna, M., & Mazzacane, S. (2018). Energy savings in hospital patient rooms: the role of windows size and glazing properties. *Energy Procedia, 148*, 1151–1158.

Christiansen, N., Kaltschmitt, M., & Dzukowski, F. (2016). Electrical energy consumption and utilization time analysis of hospital departments and large-scale medical equipment. *Energy and Buildings, 131*, 172–183.

Christiansen, N., Kaltschmitt, M., Dzukowski, F., & Isensee, F. (2015). Electricity consumption of medical plug loads in hospital laboratories: Identification, evaluation, prediction and verification. *Energy and Buildings, 107*, 392–406.

Coccagna, M., Cesari, S., Valdiserri, P., Romio, P., & Mazzacane, S. (2018). Impact of morphological and functional features on hospitals' energy consumption: A comparative analysis of six case studies. *WSEAS Trans, Environ. Dev, 14*, 212–225.

Dainese, E., Walker, S., Maassen, W., & Zeiler, W. (2019). Towards zero energy hospital buildings: a polyclinic building as case study. *E3S Web of Conferences, 111*.

Derksa, M. T. H., Mishraa, A. K., Loomansa, M. G. L. C., & Korta, H. S. M. (2018). Understanding thermal comfort perception of nurses in a hospital ward work environment. *Building and Environment, 140*, 119–127.

Esmaeili, A., Twomey, J. M., Overcash, M. R., Soltani, S. A., McGuire, C., & Ali, K. (2015). Scope for energy improvement for hospital imaging services in the USA. *Journal of Health Services Research & Policy, 20*, 67–73.

García-Sanz-Calcedo, J., Gómez-Chaparro, M., & Sanchez-Barroso, G. (2019). Electrical and thermal energy in private hospitals: Consumption indicators focused on healthcare activity. *Sustainable Cities and Society, 47*, 101482.

García-Sanz-Calcedo, J., López-Rodriguez, F., Yusaf, T., & Al-Kassir, A. (2018). Analysis of the average annual consumption of water in hospitals of Extremadura (Spain). *Energies, 10(4)*, 1–10.

Gómez-Chaparro, M., García-Sanz-Calcedo, J., & Aunión-Villa, J. (2020). Maintenance in hospitals with less than 200 beds:

Efficiency indicators. *Building Research and Information, 48*(*5*), 526–537.

González, A. G., García-Sanz-Calcedo, J., & Rodríguez, D. S. (2018). Evaluation of energy consumption in German hospitals: Benchmarking in the public sector. *Energies, 11*(*9*), 2279.

González Gil, A., López-González, J. L., Fernández, M., Eguía, P., Erkoreka, A., & Granada, E. (2018). Thermal energy demand and potential energy savings in a Spanish surgical suite through calibrated simulations. *Energy and Buildings, 174*, 513–526.

Hu, S. C., Chen, J. D., & Chuah, Y. K. (2004). Energy cost and consumption in a large acute hospital. *International Journal on Architectural Science, 5*(*1*), 11–19.

Jakka, S., & Rossbach, M. (2013). An economic perspective on personalized medicine. *The HUGO Journal, 7*(*1*), 1–6.

Khalid, W., Zaki, S. A., Rijal, H. B., & Yakub, F. (2019). Investigation of comfort temperature and thermal adaptation for patients and visitors in Malaysian hospitals. *Energy and Buildings, 183*, 489–499.

Khodakarami, J., & Nasrollahi, N. (2012). Thermal comfort in hospitals—A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16*, 4071–4077.

Krarti, M. (2020). *Energy audit of building systems: An engineering approach*. Hoboken: CRC Press.

Lee, D., & Cheng, C. (2016). Energy savings by energy management systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 56*, 760–777.

Mínguez-Gómez, C. D. (2017). *Energy consumption in Spanish hospitals and example of Geothermal. Proceedings of XXXV Congreso Nacional de Ingeniería Hospitalaria*. Spain: Las Palmas.

Moghimi, S., Azizpour, F., Mat, S., Lim, C. H., Salleh, E., & Sopian, K. (2014). Building energy index and end-use energy analysis in large-scale hospitals—Case study in Malaysia. *Energy Efficiency, 7*, 243–256.

Morgenstern, P., Li, M., Raslan, R., Ruyssevelt, P., & Wright, A. (2016). Benchmarking acute hospitals: Composite electricity targets based on departmental consumption intensities? *Energy and Buildings, 118*, 277–290.

Morgenstern, P., Raslan, R., & Huebner, G. (2016). Applicability, potential and limitations of staff-centred energy conservation initiatives in English hospitals. *Energy Efficiency, 9*, 27–48.

Nematchoua, M. K., Yvon, A., Kalameu, O., Asadi, S., Choudhary, R., & Reiter, S. (2018). Impact of climate change on demands for heating and cooling energy in hospitals: An in-depth case study of six islands located in the Indian Ocean region. *Sustainable Cities and Society, 44*, 44.

Papadopoulos, A. M. (2016). Energy efficiency in hospitals: Historical development, trends and perspectives. In *Energy Performance of Buildings* (pp. 217–233). Cham: Springer.

Pastor-Pérez, P. (2019). *Documentos técnicos de instalaciones en la edificación: Sistemas de filtración y purificación de aire*. Madrid (Spain): Atecyr.

Rohde, T., & Martinez, R. (2015). Equipment and energy usage in a large teaching hospital in Norway. *Journal of Healthcare Engineering, 6*(3), 419–434.

Sanchez-Barroso, G., & García-Sanz-Calcedo, J. (2019). Evaluation of HVAC design parameters in high-performance hospital operating theatres. *Sustainability, 11*, 1493.

San-José, J. F., Guijarro, A., Castro, F., & Villafreula, J. M. (2009). Indicadores de energía térmica en los hospitales de Castilla y León. *Todo Hospital*, *641–648*.

Santamouris, M., Dascalaki, E., Balaras, C., Argiriou, A., & Gaglia, A. (1994). Energy performance and energy conservation in health care buildings in Hellas. *Energy Conservation and Management, 35*(4), 293–305.

Shaikh, P. H., Nor, N. B. M., Nallagownden, P., & Elamvazuthi, I. (2018). Intelligent multi-objective optimization for building energy and comfort management. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 30*(*2*), 195–204.

Shen, C., Zhao, K., Ge, J., & Zhou, Q. (2019). Analysis of building energy consumption in a hospital in the hot summer and cold winter area. *Energy Procedia, 158*, 3735–3740.

Silvestro, F., Bagnasco, A., Lanza, I., Massucco, S., & Vinci, A. (2017). Energy efficient policy and real time energy monitoring in a large hospital facility: A case study. *International Journal of heat and technology, 35 no S1*, S221-S227

Spanish Ministry of Agriculture. (2018). *Emission factors. Carbon footprint registration, offsetting and carbon dioxide absorption projects*. Madrid: Spanish Ministry of Agriculture.

Spanish Ministry of Health, Social Services and Equality. (2018). *National hospital catalogue*. Madrid: Spanish Ministry of Health, Social Services and Equality.

Teke, A., & Timur, O. (2014). Assessing the energy efficiency improvement potentials of HVAC systems considering economic and environmental aspects at the hospitals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 33*, 224–235.

Thinate, N., Wongsapai, W., & Damrongsak, D. (2017). Energy performance study in Thailand hospital building. *Energy Procedia, 141*, 255–259.

Yilmazoglu, M. Z. (2017). Decreasing energy consumption and carbon footprint in a school building: a comparative study on energy audits. *International Journal of Global Warming, 13*(2), 237–257.

Zazzini, P., Montelpare, S., & Basti, A. (2018). Climate dependence of energy saving strategies in public buildings characterized by change of use: An original case study. *Energy Efficiency, 11*, 499–519.

Zuhaib, S., & Goggins, J. (2019). Assessing evidence-based single-step and staged deep retrofit towards nearly zero-energy buildings (nZEB) using multi-objective optimisation. *Energy Efficiency, 12*, 1891–1920.

Publisher's note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

I.4 Markov model of computed tomography equipment

Datos del artículo

Título en español: Modelo de Markov de un equipo de tomografía axial computerizada.

Autores: Jaime González Domínguez, Gonzalo Sánchez Barroso, Juan Aunión Villa, Justo García Sanz-Calcedo.

Nombre de la revista: Engineering Failure Analysis.

ISSN: 1350-6307

Editorial: Science Direct. Elsevier

Área temática de la revista: Engineering Failures.

Año de publicación: 2021.

DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105506

Volumen: 127.

Artículo: 105506

Indicios de calidad

Base de Indexación: Journal Citation Report

Edición: Science Citation Index Expanded (SCIE)

Categoría: Engineering, Mechanical

Posición: 44 de 135

Cuartil: Q2.

Tercil: T1

Factor de Impacto Journal Citation Report (2020): 3,114

Eigenfactor normalizado: 2,1025

Número de citas en Web of Science: 0.

Número de citas en Scopus: 0.

Número de citas en Scholar: 0.

Número de citas en Researchgate: 0.

Engineering Failure Analysis 127 (2021) 105506

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering Failure Analysis

journal homepage: www.elsevier.com/locate/engfailanal

Markov model of computed tomography equipment

Jaime González-Domínguez [a], Gonzalo Sánchez-Barroso [a], Juan Aunión-Villa [b], Justo García-Sanz-Calcedo [a,*]

[a] Engineering Projects Area. University of Extremadura, Badajoz, Spain
[b] HM Hospitals, Healthcare Engineering, University CEU San Pablo, Madrid, Spain

ARTICLE INFO

Keywords:
Markov chain
Computerised axial tomography
Healthcare centre
Sustainability
Degradation
Maintenance
Healthcare engineering

ABSTRACT

Computed tomography (CT) equipment uses a non-invasive radiology procedure to diagnose by generating images. This research aims to determine the degradation matrix and estimate the condition over time to the CT equipment to optimise their maintenance through Markov chain. The database failure history of four Spanish hospitals between 2016 and 2020 was used for this analysis. Five states of condition were used to develop the Markov degradation model, which enables the degradation of CT equipment to be properly estimated. It was found that their degradation can be modelled by Markov chains. The result is a degradation matrix with which the useful life of the equipment, the policy and the frequency of the maintenance can be established. Thus, the maintenance operations needed to reduce the equipment downtime can be determined.

1. Introduction

Computed tomography (CT) is one of the most advanced diagnostic imaging equipment around [1]. A CT scanner has X-ray tubes and detectors that rotate around the patient's body, who is positioned on a moving table. The data produced by the ionising radiation as it passes through the body is reconstructed into an image [2], which is then represented in a greyscale, which permits differentiating the structures analysed based on its density and offers significant advantages over conventional radiography procedures [3]. This fast and precise technique [4] is suitable to diagnose abdominal trauma in haemodynamically stable patients, hidden extra-thoracic metastases, congenital heart problems, bronchiectasis, tumours, mediastinal diseases, paediatric head trauma follow-up, etc. [5–9]. This equipment has increased diagnostic and therapeutic effectiveness in recent years [10], becoming an irreplaceable resource in hospitals.

However, numerous failures impair the functionality of CT [11]. Among them are artefacts, which appear frequently and can generate image interpretation errors and simulate non-existent pathologies [12]. Good coordination must be maintained among caregivers and technicians to mitigate any incidents that occur during its operation [13]. During the life of the equipment, care must be taken to ensure the quality of the electrical power supplied to the hospital's electronic equipment, as this can cause failures [14] and jeopardise patient's safety [15]. In addition, poor operator performance can lead to equipment malfunction [16]. Medical equipment used to care for patients must be safe, available and accurate [17]. Therefore, inspection and maintenance operations should be carried out to reduce the probability of system failure and improve the quality of service and patient safety [18]. These maintenance operations include preventive maintenance to avoid the equipment collapse and reduce the costs incurred by the medical centre [19]. It is

* Corresponding author.
E-mail addresses: jaimegd@unex.es (J. González-Domínguez), gsm@unex.es (G. Sánchez-Barroso), juan.aunionvilla@colaborador.ceu.es (J. Aunión-Villa), jgsanz@unex.es (J. García-Sanz-Calcedo).

https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105506
Received 8 November 2020; Received in revised form 10 May 2021; Accepted 25 May 2021
Available online 29 May 2021
1350-6307/© 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

also advisable to periodically analyse the state of obsolescence of this equipment to ensure the quality of health care provided [20]. The energy consumption of this equipment is not excessively high in the long run, since the consumption is essentially made when taking the intermittent shots. However, they do require high power for firing with peaks of 100 A.

In recent years, there has been an increase in the hospital budget for maintenance operations of high-tech medical equipment, since the quality of maintenance services is essential to ensure patients' medical care and meet the reliability results expected by the health services [21] and user requirements [22]. Typically, the expense of maintaining medical equipment over its lifetime is more significant than its initial cost [23], and the information generated during maintenance inspections can be used to detect errors caused by the use of this equipment [24].

Markov chain is a probabilistic tool used to predict the degradation suffered by a system by simulating its stochastic degradation process [25]. This model is based on the Markovian property that the future state of degradation depends only on the present state and not on the past [26]. The equipment replacement frequency can, therefore, be determined [27].

Pabon *et al.* [28] applied Markov's model to determine the replacement by obsolescence of medical radiology equipment technology. Ospina *et al.* [29] designed a continuous-time Markov chain model to model three states of CT equipment (functioning, preventive maintenance and corrective maintenance) but failed to provide an estimate of the percentage degradation of high-tech equipment based on historical data. Carnero and Gómez [30] determined the appropriate maintenance policy for four dialysis subsystems in a health centre, by applying Markov chain and the multicriteria methodology called Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique (MACBETH). Tabares and Silva [31] proposed a probabilistic algorithm based on Markov chains to predict the condition of medical equipment and developed the model for electromechanical, vacuum cleaner systems. Markov chain have also been used to determine the frequency of failure of medical equipment parts and establish the stock of spare parts [32]. Dhillon [33] proposed, among other classic analytical techniques, using Markov chains to improve the reliability and maintenance of medical equipment. Markov's chains were also used to analyse the safety culture of a Mexican hospital [34]. Gómez and Carnero used the Markov chain model to determine the most appropriate maintenance policy for medical gas distribution subsystems [35] and electric power [36] in health centres.

Although Markov chain have been used in much engineering activities, not much background has been found in state of the art on studies that apply them to predict the degradation and maintenance of high-tech medical equipment based on historical data. The novelty of this research is that it uses lies in using a proven tool to generate a degradation model able to predict the operating condition of the CT equipment. Thus, Markov chains could be used to increase both its reliability and availability alike.

2. Material and methods

2.1. General method

The general method followed to predict the operating life of CT equipment is shown in Fig. 1. In a first step, data from the maintenance history of CT equipment were obtained and processed to serve as input for the subsequent modelling of their degradation. Once the data were adequate, in the second step it was used to generate a Markov model.

One month was the chosen periodicity for the inspections and the subsequent development of the Markov model. Defining this time step made it possible to have an exhaustive control over the degradation of the set of equipment and, after developing its Markov model, to establish an appropriate maintenance policy.

2.2. Data collection and maintenance process of Computed tomography equipment

The failure history of eight CT scanners from four Spanish hospitals between 2016 and 2020 was analysed. This information was

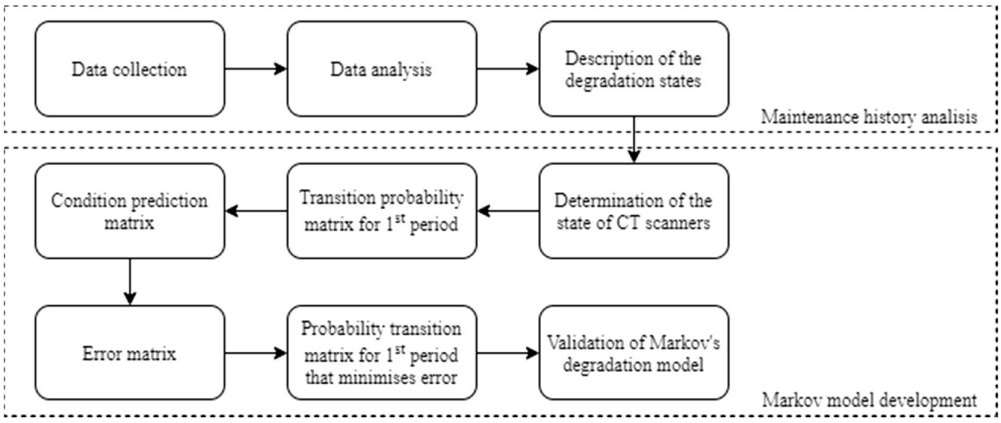


Fig. 1. Procedural steps in the research.

compiled from the regular inspections, and corrective and preventive maintenance operations carried out on this equipment. The CT scanners is between two and 13 years old, with an average of seven years old. The average unit cost was €550,000 in the range of €363,000 to €820,000.

One of the technical characteristics to be considered in CT scans is the number of image slices. Each 360-degree turn of the beam tube generates different sections of body tissue in two dimensions of thickness from 1 to 10 mm. The number of sections obtained simultaneously determines the number of image slices. The greater the number of image slices, the shorter the acquisition time and the less radiation the patient receives. This parameter is especially vital in acquiring moving tissue. The equipment studied is in the range of 16 to 160 image slices.

The manufacturer's protocol prescribes that maintenance inspections must be carried out six-monthly by their own dedicated personnel. The process starts after setting the inspection mode on CT scanners. Components inside the gantry is visual checked and the emergency bottom is operational checked. Next, the console, parts inside the gantry and oil cooler are cleaned. Operational check of the console internal fan and gantry emergency stop button are conducted. Then, power distribution, the safety circuit operation and gantry rotation speed are also verified. The X-ray system is adjusted, and the output is checked for different focal lengths. Subsequently, gantry operation panel and sensors and gantry power-supply voltage are tested. Later, maintainer checks the inside of the patient couch and the interlock mechanisms. Checking the projector projection point and interference with the covers are the latest items before a general cleaning up. Finally, the phantom is scanned to confirm that the image noises are within the standard level. Comprehensive maintenance was carried out every six months after which the manufacturer -and maintainer- certifies that equipment is in the same condition as after the first commissioning. Thus, a different device of the fault history is considered every six months. This gives a greater number of components CT scanners, which allow the degradation matrix to be estimated more accurately.

Table 1 shows the information collected in the data history.

2.3. Markov model of computed tomography equipment

Markov chains were employed to determine the degradation pattern of the CT equipment.

Since the first period hardly shows the degradation suffered by this equipment, it was eliminated. So, the second period was taken as the first one to model degradation. Thus, any error made while obtaining the transition matrix is minimised. Efforts were made to minimise the error between the degradation matrix obtained from information collected during inspections and the prediction matrix calculated using Markov chains. These matrices are obtained for a specific period (n), and the error between them is reduced using a calculation programme [37].

The degradation states that can be found in the CT equipment were defined, from a very good working condition to collapse. Each level of degradation is represented by a state so that the component studied -a CT scan- is transformed into a multi-state system [38]. The Markov property states that the degradation state of a component depends only on the last observed state [39]. Different occurrences were assigned to each degradation state to determine the condition of a CT scan during an inspection. The degradation scale used, shown in Table 2, ranges from 1 to 5, starting with a very good condition and ending with the collapse of the CT scanner.

These events were obtained in a meeting with CT scan maintenance experts at the hospitals analysed, who verified the level of degradation of each state. Thus, it was determined that the collapse of the CT scan occurs when it reaches degradation state 4 or 5 since these degradation states make it impossible to perform diagnostic tests on patients.

The observation matrix for each period n, $[O_n]_{ij}$, was constructed once the degradation states of the CT scanner were specified from the information collected by the maintenance experts. They observed the initial degradation state of the CT scanners and determining the final degradation state after a period n.

The observation matrix counted the number of CT scanners found in each of the degradation states after an inspection and it has the structure shown in Fig. 2. So, each element represented the amount of equipment from state i that transitioned to state j in period n.

The state transition probability from i to j matrix within a given period can be obtained from that information following the percentage prediction method [40].Eq. (1) expresses how to determine the elements of the transition probability matrix [41].

$$P_{ij} = O_{ij} / \sum_{x=1}^{N} O_{ix} \tag{1}$$

where P_{ij} are the elements of the state transition probability matrix, O_{ij} are the elements of the observation matrix and O_{ix} is the sum of

Table 1
Information collected in the data history.

Name	Unit	Type
Year of installation	Years	Maintenance
Days worked	Days	Working day
Days worked after hours	Days	Working day
Repaired CT scan	Unit	Maintenance
Preventive maintenance	Hours	Maintenance
Modifications on request from the factory	Hours	Maintenance
Errors that require physical intervention	Hours	Equipment failure
Errors that require remote intervention	Hours	Equipment failure

Table 2
Degradation scale.

State	Condition	Description	Example
1	Very good	It presents no kind of failure or error	The six-monthly inspection has just taken place
2	Good	Presents a fault or error that does not impair the functionality	A wireless communication problem is detected
3	Adequate	Presents a fault or error that impairs the functionality	Dirt is detected in certain non-major components
4	Severe	Presents several faults or errors that impair the functionality	Some image reconstruction problem is occurring at the same time as other functionality is not working.
5	Unacceptable	Failure or error that makes the CT scan inoperable	The X-ray tube has reached the end of its service life

$$[O] = \begin{bmatrix} O_{11} & O_{12} & \cdot & \cdot & O_{1j} \\ O_{21} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ O_{i1} & \cdot & \cdot & \cdot & O_{ij} \end{bmatrix}$$

Fig. 2. Observation matrix.

CT scanners that were initially in state i and transitioned to any state x. This is how the transition matrix was obtained in the first period, $[P]_1$.

Then discrete Markov model was implemented to obtain the state transition probability matrix in the following periods analysed. This model allowed calculating the probability of a CT scanner going from state i to state j in a specific period [42]. Eq. (2) shows the calculation of the transition matrix in periods $n \neq 1$.

$$[P]_n = [P]_1^n \tag{2}$$

The condition prediction matrix is then calculated. This matrix allows predicting the number of equipment in a state of degradation after some time n. Eq. (3) shows the calculation of the elements that make up the condition prediction matrix.

$$C_{ij} = P_{ij}\hat{\mathrm{A}} \cdot \sum_{x=1}^{5} O_{ix} \tag{3}$$

where C_{ij} are the elements of the condition prediction matrix, P_{ij} the elements of the transition probability matrix, and O_{ix} is the sum of CT scanners that were initially in state i and transitioned to any state x.

Finally, the error between the observation matrix and the condition prediction matrix for a period n must be determined. Thus, the difference between the elements of both matrices is calculated to minimise the error later on. The elements of the error matrix E_{ij} are calculated by Eq. (4).

$$E_{ij} = (O_{ij} - C_{ij})^2 \tag{4}$$

where E_{ij} the elements of the error matrix, O_{ij} are the elements of the observation matrix, and E_{ij} are the condition prediction elements.

All the elements of the error matrix must be added together beforehand, $[E]$, to minimise the error. This is repeated for all the periods analysed. Therefore, the elements of all the error matrices should be added up, and their result weighted according to the number of CT scanners observed in the period, as reflected in Eq. (5) and Eq. (6).

$$E_p = \sum E_{ij} \tag{5}$$

$$E_{total} = \sum_{p=1}^{n} (E_p\hat{\mathrm{A}} \cdot O_p/O_T) \tag{6}$$

being E_{total} the total error of the analysis,E_p and O_p are the error and the number of CT scanners observed for a given period and O_T is the number of CT scanners observed in all the estimated periods.

The transition matrix of the first period, $[P]_1$, is determined applying Generalized Reduced Gradient method, which minimises the total error obtained. Thus a transition matrix corresponding to the first period that best suited to all the observed periods can be achieved. Fig. 3 shows the transition probability matrix for the first period.where p_{ij} is the probability of the CT scanners changing from condition state i to condition state j in a given time.

These properties constitute the transition matrix of the Markov model. The degradation state of the equipment depends only on the last observed degradation state and the transition of state probability described in the matrix of Fig. 3 [43].

Once the transition matrix best suited to the deterioration of the CT scanners is obtained, the probability of the CT equipment being in each of the degradation states over time is obtained. First, S_0 is defined as the initial state vector of degradation. The elements of this vector represent the initial state of degradation of the CT scanners. It will, therefore, have five elements. All elements of the initial state vector have the value of 0 except the element representing the degradation of the CT scan, which takes the value of 1. Considering that the CT equipment presents the best state of condition, the initial vector is expressed in Eq. (7).

$$S_0 = [10000] \tag{7}$$

Knowing the initial degradation state of the CT scanner at a given time and its transition matrix, the probabilities of it being in each of the degradation states in Table 1 at the next inspection were determined. The degradation vector of the CT scan is set at the nth observation, S_n. The degradation state vector of the CT scan can be obtained with the Chapman-Kolmogorov formula expressed in the Eq. (8).

$$S_n = S_0 \hat{\mathrm{A}} \cdot [P]_1^n \tag{8}$$

where S_0 is the initial degradation state vector and $[P]_1^n$ the transition probability matrix in period n.

The degradation model was then validated. The goodness-of-fit of the statistical model was analysed using Pearson's Chi-squared test, which determine the discrepancy between the observed values and the values obtained from the model [44]. Then, the probabilistic-based deterioration model proposal of Markov chains was found to be consistent with the set of equipment observed. Thus, χ^2 test is represented in Eq. (11).

$$\chi^2 = \sum_i^n \frac{(O_i - C_i)^2}{C_i} \tag{9}$$

where n is the number of periods analysed, O_i are the elements of the observation matrix, and C_i are the elements of the condition prediction matrix.

3. Results

The data obtained were classified over a 12-month time horizon, and the factors influencing the degradation of the equipment and its impact were determined. The state of degradation of the analysed equipment was also determined, and the number of CT scanners found in each state of degradation after a period n was obtained. Table 3 shows the observation matrix obtained for periods 2, 3, 4, 5 and 6.

The analysed equipment in the research appear to follow a degradation pattern, and as the observation period increases, more equipment is in a worse condition. Moreover, Fig. 4 shows the evolution of the number of CT scanners in each of the degradation states depending on the period analysed. As the period increases, the number of CT scanners found in the states of collapse also increased, and those in state 1 decreased. This is logical since the degradation of the observed equipment increases over time.

Fig. 5 shows the transition probability matrix of the second period, the elements of which were obtained using Eq. (2).

The elements of the transition matrix represent the probability of the equipment being in the various stages of degradation after one month. Multiplying each element by one hundred gives the probability as a percentage. In addition, all the elements corresponding to a row add up to 100%, which verifies that all the equipment studied is in one of the degradation states. The shape of the matrix is similar to that obtained in other studies [45]. The matrix in Fig. 5 has zeros under the main diagonal and state 5 is absorbing state due to the irreparability of a CT scanner when the X-ray tube breaks down. At the end of life, this part must be replaced - not repaired - with a new one. This implies a re-commissioning of the machine.

The transition probability matrix for these periods was then obtained using Eq. (2). Table 4 shows the values of the transition matrix of periods 3, 4, 5 and 6.

The probability of the equipment being in the first state of degradation decreased as the number of periods increased. This is logical due to the equipment is more degraded over time. The probability of CT scanner being in the unacceptable state, when it states 1, 2, 3 and 4 initially, is zero. This is due to the transition matrix obtained in Fig. 5 and is corrected by minimising the error.

Eq. (3) was used to obtain the condition prediction matrix, determining the number of CT scanners found in each of the degradation states as predicted by the Markovian model. Eq. (4) determines the error of the Markov model concerning the observation matrices. Table 5 shows the prediction and error matrices for the analysed periods.

The second period of the condition prediction matrix coincided with its observation matrix. Therefore, there is no error for the

$$[P]_1 = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdot & \cdot & p_{1j} \\ p_{21} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ p_{i1} & \cdot & \cdot & \cdot & p_{ij} \end{bmatrix}$$

Fig. 3. Transition probability matrix for the first period.

Table 3
Observation matrix for the one-month interval.

$$[O]_2 = \begin{bmatrix} 29 & 4 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 10 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 \end{bmatrix}; \sum O_{ix} = \begin{bmatrix} 36 \\ 12 \\ 5 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix};$$

$$[O]_3 = \begin{bmatrix} 23 & 2 & 2 & 2 & 0 \\ 0 & 10 & 3 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 7 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 \end{bmatrix}; \sum O_{ix} = \begin{bmatrix} 29 \\ 14 \\ 8 \\ 4 \\ 3 \end{bmatrix};$$

$$[O]_4 = \begin{bmatrix} 18 & 3 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 9 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 7 & 4 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \end{bmatrix}; \sum O_{ix} = \begin{bmatrix} 23 \\ 12 \\ 12 \\ 6 \\ 5 \end{bmatrix}; [O]_5 = \begin{bmatrix} 13 & 2 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 8 & 2 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 8 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6 \end{bmatrix}; \sum O_{ix} = \begin{bmatrix} 18 \\ 12 \\ 11 \\ 11 \\ 6 \end{bmatrix};$$

$$[O]_6 = \begin{bmatrix} 8 & 4 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 7 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 9 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 13 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 9 \end{bmatrix}; \sum O_{ix} = \begin{bmatrix} 13 \\ 10 \\ 11 \\ 15 \\ 9 \end{bmatrix};$$

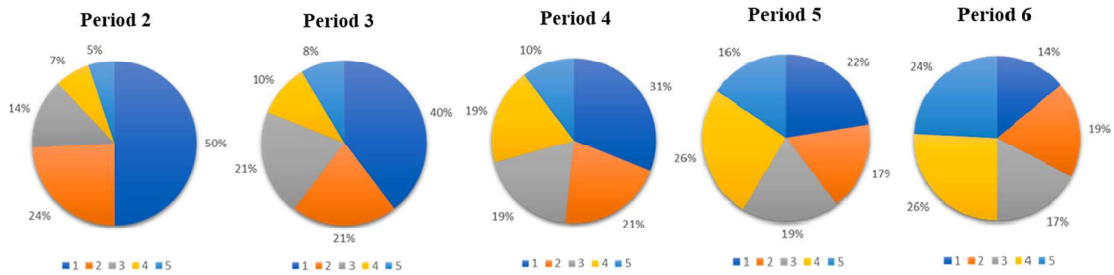


Fig. 4. Number of CT scanners in each state as compared to the periods analysed.

$$[P]_2 = \begin{bmatrix} 0.8056 & 0.1111 & 0.0556 & 0.0278 & 0 \\ 0 & 0.8333 & 0.0833 & 0.0833 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Fig. 5. Transition probability matrix for the first period analysed.

Table 4
Transition probability matrix.

$$[P]_3 = \begin{bmatrix} 0.65 & 0.18 & 0.11 & 0.06 & 0 \\ 0 & 0.69 & 0.15 & 0.15 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; [P]_4 = \begin{bmatrix} 0.52 & 0.22 & 0.16 & 0.09 & 0 \\ 0 & 0.58 & 0.21 & 0.21 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$[P]_5 = \begin{bmatrix} 0.42 & 0.24 & 0.21 & 0.13 & 0 \\ 0 & 0.48 & 0.26 & 0.26 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; [P]_6 = \begin{bmatrix} 0.34 & 0.25 & 0.25 & 0.16 & 0 \\ 0 & 0.40 & 0.30 & 0.30 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

second period analysed. All the errors in the matrices are then added up and weighted according to Eq. (6). Calculation software generates the transition matrix, which minimises the error obtained in all periods. The non-linear Generalised Reduced Gradient (GRG) optimisation method was used to determine the Markov model that best suits the degradation of the observed equipment during the inspections. Fig. 6 shows the solution that best fits the Markov model and the fault history, and Fig. 7 shows the state transition graph corresponding to its transition matrix.

This matrix reflects the degradation of the equipment studied. As the state of degradation increased the probability of the equipment being on the state is lower. For example, if a CT scan is in an initial state 1, the probability of it being in state 5 is less than that of it being in state 4. The matrix suffers a gradual degradation, so the higher the state of the system, the probability of it changing state increases. This is significant since it reflects that the degradation of the CT scan increases the probability of change of state. The

Table 5
The condition prediction matrix and error matrix obtained for each of the periods analysed.

$$[C]_2 = \begin{bmatrix} 29 & 4 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 10 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 \end{bmatrix}; [E]_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$[C]_3 = \begin{bmatrix} 18.82 & 5.28 & 3.12 & 1.72 & 0 \\ 0 & 9.72 & 2.14 & 2.14 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 \end{bmatrix}; [E]_3 = \begin{bmatrix} 17.48 & 10.76 & 1.39 & 0.08 & 0 \\ 0 & 0.08 & 0.74 & 1.30 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$[C]_4 = \begin{bmatrix} 12.02 & 5.15 & 3.70 & 2.13 & 0 \\ 0 & 6.94 & 2.53 & 2.53 & 0 \\ 0 & 0 & 12 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \end{bmatrix}; [E]_4 = \begin{bmatrix} 35.72 & 4.61 & 2.88 & 4.54 & 0 \\ 0 & 4.23 & 0.28 & 2.33 & 0 \\ 0 & 0 & 25 & 16 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$[C]_5 = \begin{bmatrix} 7.58 & 4.40 & 3.75 & 2.26 & 0 \\ 0 & 5.79 & 3.11 & 3.11 & 0 \\ 0 & 0 & 11 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 11 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6 \end{bmatrix}; [E]_5 = \begin{bmatrix} 29.38 & 5.78 & 7.58 & 1.60 & 1 \\ 0 & 4.90 & 1.22 & 4.44 & 1 \\ 0 & 0 & 9 & 9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$[C]_6 = \begin{bmatrix} 4.41 & 3.26 & 3.28 & 2.05 & 0 \\ 0 & 4.02 & 2.99 & 2.99 & 0 \\ 0 & 0 & 11 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 15 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 9 \end{bmatrix}; [E]_6 = \begin{bmatrix} 12.89 & 0.55 & 10.76 & 4.21 & 1 \\ 0 & 8.89 & 3.96 & 3.96 & 1 \\ 0 & 0 & 4 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$[P]_1 = \begin{bmatrix} 0.8993 & 0.0582 & 0.0238 & 0.0113 & 0.0059 \\ 0 & 0.9002 & 0.0590 & 0.0241 & 0.0137 \\ 0 & 0 & 0.9190 & 0.0606 & 0.0168 \\ 0 & 0 & 0 & 0.9725 & 0.0268 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Fig. 6. Transition matrix for the first period that minimises error.

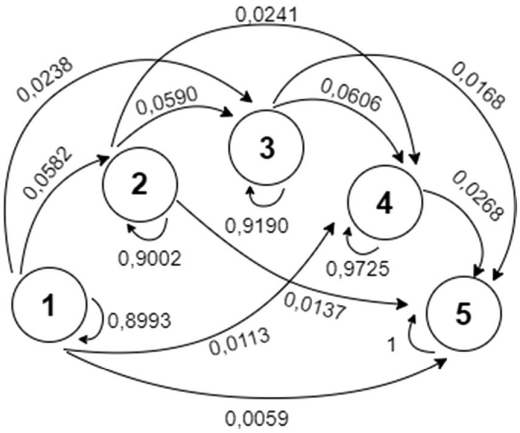


Fig. 7. Markov chain state transition diagram.

elements of the transition matrix give all the necessary information about the degradation of a CT scan. For example, the element in the third row and fourth column represents a piece of equipment initially in a state of degradation 3 and has a 6.06% chance of being in state 4 after a period of one month.

The degradation matrix allows obtaining the probability that a particular CT scanner is in one of the states of collapse and building the curves that represent the probability that a CT scan equipment is in one of the 5 states of degradation at a given time. This was based on the assumption that the initial condition of the CT equipment was very good, as certified by the manufacturer after carrying out the comprehensive six-monthly maintenance action. Fig. 8 shows the evolution over time of the CT scanners's probability of being in one of the states.

Up to the eighth period only the probability of the CT scan being in degradation state 1 decreases, while the probability of the remaining states increases. From then on, the probability of the CT scanners being in states 2 and 3 decreases because the probability of the states of collapse, 4 and 5, increases considerably. The probability of stage 2 decreases more rapidly than that of stage 3. Over time,

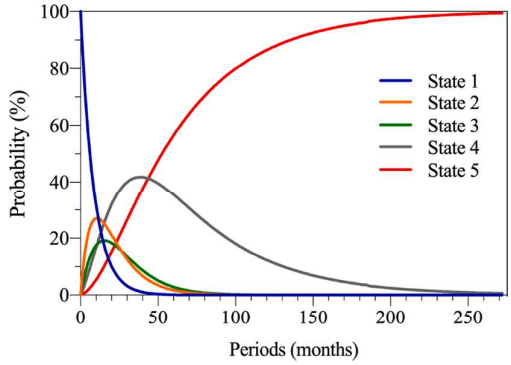


Fig. 8. Computed tomography scan state probability curves.

the probability of the CT scanners being in states 1, 2 and 3 is 0, while the probability of state 5 increases considerably. This reflects the degradation of the equipment over time and how the probability of it being in a state of collapse increases.

Finally, the number of equipment in each state of degradation was determined according to the transition matrix obtained. This allows comparing the discrepancy between the equipment observed in the inspections and those predicted by the Markov chains and applying Pearson's χ^2 test [46]. After this, Eq. (9) is applied, obtaining the values of χ^2. Table 6 predicts the number of equipment in each state of degradation in each period studied according to the Markov model and shows the χ^2 values obtained.

A 95% confidence level validated the model. Adding up all the values of χ^2 of the elements in Table 6 gives a value of 33.02. By setting a freedom value of 50, the calculated value of 33.02 was determined to be less than the value of χ^2 for a significance level of 0.05. Therefore, it was verified that the proposed Markov model is suitable to estimate the deterioration of the equipment with a 95% confidence level. So the discrepancy between what is predicted by the Markov model and what is observed during maintenance inspections is acceptable with a high level of confidence.

4. Discussion

The selection, acquisition, maintenance and life cycle of healthcare technology are essential aspects to guarantee its profitability, updating and compliance with the corporate objectives of a healthcare organisation [47]. It was found that by applying Markov chains, it is possible to properly determine the degradation matrix of CT equipment and estimate the degradation they suffer over time to then establish the most appropriate maintenance policy and frequency. Thanks to this, the equipment is kept in favourable conditions and avoids the states of collapse with the desired minimum reliability, which also reduces the downtime and increases the number of diagnoses and follow-ups that can be made on the patients [48].

In recent years, the quality and complexity of hospital equipment have multiplied, increasing the concern of hospital facility managers [49]. Maintenance of this equipment should be considered under the headings of safety, calibration and repair [50]. By

Table 6
Condition prediction matrix obtained from the final transition matrix and χ^2 values of the study.

$$[\boldsymbol{C}]_2 = \begin{bmatrix} 32.38 & 2.09 & 0.86 & 0.41 & 0.21 \\ 0 & 10.80 & 0.71 & 0.29 & 0.16 \\ 0 & 0 & 4.59 & 0.30 & 0.08 \\ 0 & 0 & 0 & 1.94 & 0.05 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 \end{bmatrix}; [\chi^2]_2 = \begin{bmatrix} 0.35 & 1.73 & 1.52 & 0.86 & 0.21 \\ 0 & 0.06 & 0.12 & 1.74 & 0.16 \\ 0 & 0 & 0.04 & 0.30 & 0.08 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.05 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$[C]_3 = \begin{bmatrix} 23.46 & 3.04 & 1.36 & 0.70 & 0.37 \\ 0 & 11.34 & 1.50 & 0.68 & 0.39 \\ 0 & 0 & 6.76 & 0.92 & 0.27 \\ 0 & 0 & 0 & 3.78 & 0.21 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 \end{bmatrix}; [\chi^2]_3 = \begin{bmatrix} 0.01 & 0.35 & 0.30 & 2.44 & 0.37 \\ 0 & 0.16 & 1.49 & 0.15 & 0.39 \\ 0 & 0 & 0.01 & 0.92 & 1.97 \\ 0 & 0 & 0 & 0.16 & 2.95 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$[\boldsymbol{C}]_4 = \begin{bmatrix} 16.73 & 3.25 & 1.57 & 0.87 & 0.47 \\ 0 & 8.75 & 1.76 & 0.88 & 0.50 \\ 0 & 0 & 9.31 & 1.95 & 0.61 \\ 0 & 0 & 0 & 5.52 & 0.47 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \end{bmatrix}; [\chi^2]_4 = \begin{bmatrix} 0.10 & 0.02 & 0.12 & 0.87 & 0.47 \\ 0 & 0.01 & 0.03 & 0.02 & 0.50 \\ 0 & 0 & 0.57 & 2.15 & 0.25 \\ 0 & 0 & 0 & 0.04 & 0.47 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$[C]_5 = \begin{bmatrix} 11.77 & 3.05 & 1.59 & 0.95 & 0.52 \\ 0 & 7.88 & 2.13 & 1.17 & 0.68 \\ 0 & 0 & 7.85 & 2.26 & 0.75 \\ 0 & 0 & 0 & 9.84 & 1.13 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6 \end{bmatrix}; [\chi^2]_5 = \begin{bmatrix} 0.13 & 0.36 & 0.22 & 0 & 0.45 \\ 0 & 0 & 0.01 & 0.03 & 0.15 \\ 0 & 0 & 0 & 0.24 & 0.75 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.02 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$[C]_6 = \begin{bmatrix} 7.65 & 2.48 & 1.39 & 0.88 & 0.49 \\ 0 & 5.91 & 2.02 & 1.29 & 0.71 \\ 0 & 0 & 7.21 & 2.67 & 0.94 \\ 0 & 0 & 0 & 13.05 & 1.90 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 9 \end{bmatrix}; [\chi^2]_6 = \begin{bmatrix} 0.02 & 0.93 & 1.39 & 0.88 & 0.53 \\ 0 & 0.20 & 0.51 & 0.04 & 0.12 \\ 0 & 0 & 0.44 & 1.05 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.01 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

identifying the condition of the inspected equipment and applying the Markov model, the maintenance to prevent the equipment from reaching a state of collapse can be designed. This maintenance is complemented by periodic preventive maintenance [51], which consist of software updates or equipment calibration.

When the hospital contracts a comprehensive service with the manufacturer, the latter takes care of all necessary maintenance for a fixed annual fee. In this case, the results of the research are very interesting for the manufacturer, since they can optimise the policy and frequency of the maintenance selected and, consequently, reduce the cost of the maintenance while the equipment is in optimal conditions [52]. This technique also allows the hospital to contrast the equipment replacement programme established by the manufacturer and replace equipment when their useful life is over [53]. In addition, when the hospital has a full-service contract [54], the model would not lead to savings in maintenance, since the amount is fixed regardless of the maintenance frequency and policy [55]. However, the collapse of the CT equipment would entail considerable loss of income and poor quality of care because patients cannot be diagnosed. Therefore, the reduction in CT equipment downtime offered by the Markov model translates into an increase in revenue and quality of care.

This degradation model has advantages over the Service Life Cycle [56], based on the replacement of the asset when it reaches the end of its useful life. The Markov model determines the most appropriate maintenance frequency and policy to optimise the time the system can operate properly. Thus, the Markov chains offer the possibility of calculating the equipment's end of life based on its reliability [57]. This is of great importance in the health sector. Thus, the reliability of the equipment is prioritised over the cost of replacement. This point interests healthcare systems, as they can establish whether the manufacturers' recommended service life is appropriate and not influenced by commercial or profitability aspects. Dose control [58] is one of the most critical factors for the renewal of equipment, but this should not be the only aspect to be weighed in, as the life of the equipment is also of great significance. Therefore, the replacement of the components of CT scanner must be established based on a combination of these factors.

The decrease in breakdowns of high-tech equipment in hospitals allows for increased availability, better health service [59] and improved patient satisfaction [60]. In addition, anticipating system failure decreases the time the equipment is out of use and increases the quality and number of diagnostics [61]. Future work should aim at calculating the degradation matrix of other high-tech equipment, determining its maintenance policy.

5. Conclusions

Five states of condition were used to develop the Markov degradation model, which enables the degradation of CT equipment to be properly estimated. The proposed degradation model was verified by analysing Pearson's χ^2. In this case, the results of the research are very interesting for the manufacturer, since they can optimise the policy and frequency of the maintenance selected and, consequently, reduce the cost of the maintenance, so the equipment is in optimal conditions. The *p*-value obtained was lower than the corresponding 95% confidence level, so the degradation model proposed by Markov turned out to be valid for the equipment analysed. Thus, the discrepancy between the observed equipment and that condition predicted by the Markov chains does not invalidate the problem.

The result was a degradation matrix of the computerised tomography equipment which permits determining the useful life of the equipment, the policy and the frequency of the maintenance. It was a simple and easily updatable tool that adequately estimates the degradation of equipment over time, allowing the risk of this equipment remaining out of use to be minimised.

This research is useful for predicting the operating life of CT equipment installed in hospital centres, minimising their downtime. The Markov chain is a simple model that allows obtaining the degradation of a particular system based on an existing data history; a flexible model that can easily update its data. In addition, this model could manage the maintenance actions of the CT equipment of any hospital, giving the maintenance manager a tool to estimate the life of the equipment after initially determining its state of degradation during an inspection.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

The authors wish to acknowledge the European Regional Development Fund for the financial support provided through Research Projects GR18029 linked to the VI Regional Plan for Research, Technical Development and Innovation from the Regional Government of Extremadura (2017-2020).

References

[1] J. Estornell Erill, La tomografía computarizada en cardiopatía isquémica: de la calcificación coronaria a la caracterización tisular miocárdica, Cirugía Cardiovasc. 22 (2015) 92–96, https://doi.org/10.1016/j.circv.2014.10.003.
[2] A. Calzado, J. Geleijns, Computed Tomography. Evolution, technical principles and applications, Rev. Física Médica. 3 (2011) 163–180.
[3] J. Galimany, I. Blanca, Verifique sus conocimientos sobre tomografía computarizada (TC), Nurs. (Ed. Española). 28 (2010) 60–66, https://doi.org/10.1016/s0212-5382(10)70437-4.
[4] D.T. Ginat, R. Gupta, Advances in Computed Tomography Imaging Technology, Annu. Rev. Biomed. Eng. 16 (2014) 431–453, https://doi.org/10.1146/annurev-bioeng-121813-113601.

[5] R.M. Girón Moreno, G. Fernandes Vasconcelos, C. Cisneros, R.M. Gómez-Punter, G. Segrelles Calvo, J. Ancochea, Presence of anxiety and depression in patients with bronchiectasis unrelated to cystic fibrosis, Arch. Bronconeumol. 49 (2013) 415–420, https://doi.org/10.1016/j.arbr.2013.08.001.

[6] F. Sánchez Ferrer, F.J. Castro García, J. Pérez-Lescure Picarzo, F. Roses Noguer, F. Centeno Malfaz, M.D. Grima Murcia, D.A. Brotons, Current situation of the organisation, resources and activity in paediatric cardiology in Spain, An. Pediatr. 90 (2019) 94–101, https://doi.org/10.1016/j.anpedi.2018.03.004.

[7] M.A. Gavín-Clavero, T. Usón-Bouthelier, Ú.M. Jariod-Ferrer, A. Fernández-Larrañaga, B. Pantilie, F. Lobera-Molina, M.V. Simón-Sanz, B. Nadal Cristóbal, Accuracy of FNAC and CT in the differentiation of benign and malignant parotid tumours in a case series, Acta Otorrinolaringol. Esp. 69 (2018) 25–29, https://doi.org/10.1016/j.otorri.2017.05.003.

[8] B. Dong, Y. Zhang, S. Ye, Y. Zhou, Z. He, S. Xie, Dual-channel phase-contrast spectral optical coherence tomography for simultaneously measuring axial and normal to B-scan off-axial displacements, Opt. Lasers Eng. 96 (2017) 35–38, https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2017.04.007.

[9] E.S. Bartlett, T.D. Walters, E. Yu, Can Axial-Based Nodal Size Criteria Be Used in Other Imaging Planes to Accurately Determine "Enlarged" Head and Neck Lymph Nodes? ISRN Otolaryngol. 2013 (2013) 1–7, https://doi.org/10.1155/2013/232968.

[10] M. del C. Ortega-Navas, The use of New Technologies as a Tool for the Promotion of Health Education, Procedia - Soc. Behav. Sci. 237, 2017, 23–29. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2017.02.006.

[11] P. Crespo, J.M. Delgado, A. Hervás, C. Prieto, A.P. Mulas, M.L. Ramírez, A. Cascajo, A. González, C. Sánchez, J. Vilanova, C. Álvarez, J. Zarzuela, Y. Agra, Proyecto MARR. Modelo de Errores y fallos potenciales en radioterapia, 2013. https://sefm.es/wp-content/uploads/2017/06/3.-Marr-modelo-de-errores-y-fallos-potenciales-en-radioterapia.pdf (accessed June 24, 2020).

[12] P. Sartori, M. Rozowykniat, L. Siviero, G. Barba, A. Peña, N. Mayol, D. Acosta, J. Castro, A. Ortiz, Artefactos y artificios frecuentes en tomografía computada y resonancia magnética, Rev. Argentina Radiol. 79 (2015) 192–204, https://doi.org/10.1016/j.rard.2015.04.005.

[13] J.A. Hernández, Armas, C.J.P. Martín, J.Z.H. Santana, J.C.F. de Aldecoa, Gestión técnica de equipos y sistemas médicos en red, in: Conf. X Congr. Nac. La Soc. Española Electromed. e Ing. Clínica - SEEIC 2012, Barcelona, España, 2012.

[14] U. Rao, S.N. Singh, C.K. Thakur, Power quality issues with medical electronics equipment in hospitals, in: 2010 Int Conf. Ind. Electron. Control Robot. IECR 2010, 2010, pp. 34–38, 10.1109/IECR.2010.5720150.

[15] G. Bucci, F. Ciancetta, A. Fioravanti, E. Fiorucci, A. Prudenzi, Application of SFRA for diagnostics on medical isolation transformers, Int. J. Electr. Power Energy Syst. 117 (2020), 105602, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105602.

[16] Z.E.M. Tabares, E.V. Silva, Y.C. Mota, Stock optimization of spare parts for medical equipments, Rev. Cuba. Ciencias Informáticas. 9 (2015) 99–114.

[17] J. Aunión-Villa, M. Gómez-Chaparro, J. García Sanz-Calcedo, Assessment of the maintenance costs of electro-medical equipment in Spanish hospitals, Expert Rev. Med. Dev. (2020) 1–11, https://doi.org/10.1080/17434440.2020.1796635.

[18] S. Taghipour, D. Banjevic, A.K.S. Jardine, Risk-based Inspection and Maintenance for Medical Equipment, in: Proc. 2008 Ind. Eng. Res. Conf., 2008: p. 2008.

[19] P. Alikhani, S. Vesal, P. Kashefi, R.E. Pour, F. Khorvash, G. Askari, R. Meamar, Application and Preventive Maintenance of Neurology Medical Equipment in Isfahan Alzahra Hospital, Int. J. Prev. Med. 2 (2013) 323–329.

[20] M.A. Trapero García, I. López Parrilla, Guía de la SERAM para la renovación y actualización tecnológica en radiología, Radiologia. 61 (2019) 35–41, https://doi.org/10.1016/j.rx.2018.09.004.

[21] A. Jamshidi, S.A. Rahimi, D. Ait-kadi, A. Ruiz, A comprehensive fuzzy risk-based maintenance framework for prioritization of medical devices, Appl. Soft Comput. 32 (2015) 322–334, https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.03.054.

[22] L. Pecchia, J.L. Martin, A. Ragozzino, C. Vanzanella, A. Scognamiglio, L. Mirarchi, S.P. Morgan, User needs elicitation via analytic hierarchy process (AHP). A case study on a Computed Tomography (CT) scanner, BMC Med. Inform. Decis. Mak. 13 (2013) 2, https://doi.org/10.1186/1472-6947-13-2.

[23] A. Jamshidi, S.A. Rahimi, D. Ait-kadi, A.R. Bartolome, Medical devices Inspection and Maintenance; A Literature Review. Proc. 2014 Ind. Syst. Eng. Res. Conf., Montreal, Canada, 2014.

[24] C.J. Flewwelling, A.C. Easty, K.J. Vicente, J.A. Cafazzo, The use of fault reporting of medical equipment to identify latent design flaws, J. Biomed. Inform. 51 (2014) 80–85, https://doi.org/10.1016/j.jbi.2014.04.009.

[25] A.E. Mejía, M. Holgun, G. Betancourt, Uso de las cadenas de Markov en la selección de políticas de mantenimiento, Sci. Tech. XIII (20117) 115–120.

[26] K.G. Papakonstantinou, M. Shinozuka, Optimum inspection and maintenance policies for corroded structures using partially observable Markov decision processes and stochastic, physically based models, Probabilistic Eng. Mech. 37 (2014) 93–108, https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2014.06.002.

[27] J.C. Hartman, C.H. Tan, Equipment Replacement Analysis: A Literature Review and Directions for Future Research, Eng. Econ. 59 (2014) 136–153, https://doi.org/10.1080/0013791X.2013.862891.

[28] A. Pabon, L.A. Gaviria, Á.M. Wilches, J.J. Bravo, Análisis causal de reemplazo de equipos médicos radiológicos a causa de obsolescencia tecnológica, Rev. Espac. 39 (2018) 9.

[29] V.E. Ospina, A.F. Cardona, W.J. Guerrero, Information Technologies and Analytics as Decision Support Systems in Hospital Logistics: Four Research Experiences in the Colombian Case, Int. J. Internet Things Web Serv. 2 (2017) 136–141.

[30] M.C. Carnero, A. Gómez, A multicriteria decision making approach applied to improving maintenance policies in healthcare organizations, BMC Med. Inform. Decis. Mak. 16 (2016) 47, https://doi.org/10.1186/s12911-016-0282-7.

[31] Z.E.M. Tabares, E.V. Silva, Algorithm for prediction of the technical availability of medical equipment, Appl. Math. Sci. 9 (2015) 6735–6746, https://doi.org/10.12988/ams.2015.55400.

[32] E.M. Tabares, E.V. Silva, A.C. Campos, MPREDSTOCK: Modelo multivariado de predicción del stock de piezas de repuesto para equipos médicos, Rev. Cuba. Ciencias Informáticas. 10 (2016) 143–159.

[33] B.S. Dhillon, Medical equipment reliability: a review, analysis methods and improvement strategies, Int. J. Reliab. Qual. Saf. Eng. 18 (2011) 391–403, https://doi.org/10.1142/S0218539311004317.

[34] J.D. Velázquez-martínez, H.C.J. Santos-reyes, Análisis y modelado de la cultura de seguridad de un hospital mexicano mediante cadenas de Markov, Rev. Calid. Asist. (2016) 1–6, https://doi.org/10.1016/j.cali.2016.03.001.

[35] A. Gómez, M.C. Carnero, Decision Support System for maintenance policy optimization in medicinal gases subsystems, IFAC-PapersOnLine 49 (2016) 268–273, https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.046.

[36] M.C. Carnero, A. Gómez, Maintenance strategy selection in electric power distribution systems, Energy. 129 (2017) 255–272, https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.100.

[37] M.N. Grussing, L.Y. Liu, D.R. Uzarski, K. El-Rayes, N. El-Gohary, Discrete Markov Approach for Building Component Condition, Reliability, and Service-Life Prediction Modeling, J. Perform. Constr. Facil. 30 (2016) 04016015, https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000865.

[38] M.D. Le, C.M. Tan, Optimal maintenance strategy of deteriorating system under imperfect maintenance and inspection using mixed inspectionscheduling, Reliab. Eng. Syst. Saf. 113 (2013) 21–29, https://doi.org/10.1016/j.ress.2012.11.025.

[39] G. Masetti, L. Robol, Computing performability measures in Markov chains by means of matrix functions, J. Comput. Appl. Math. 368 (2020), 112534, https://doi.org/10.1016/j.cam.2019.112534.

[40] R. Ruparathna, K. Hewage, R. Sadiq, Multi-period maintenance planning for public buildings: A risk based approach for climate conscious operation, J. Clean. Prod. 170 (2018) 1338–1353, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.178.

[41] K.G. Papakonstantinou, M. Shinozuka, Planning structural inspection and maintenance policies via dynamic programming and Markov processes. Part II: POMDP implementation, Reliab. Eng. Syst. Saf. 130 (2014) 214–224, https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.04.006.

[42] A. Sharabah, S. Setunge, P. Zeephongsekul, Use of Markov Chain for Deterioration Modeling and Risk Management of Infrastructure Assets, in: Int. Conf. Inf. Autom., IEEE, 2006, pp. 384–389, 10.1109/ICINFA.2006.374109.

[43] A. Silva, P.L. Gaspar, J. De Brito, Probabilistic analysis of degradation of façade claddings using Markov chain models, Mater. Struct. 49 (2016) 2871–2892.

[44] R. Edirisinghe, S. Setunge, G. Zhang, Markov Model—Based Building Deterioration Prediction and ISO Factor Analysis for Building Management, J. Manag. Eng. 31 (2015) 04015009, https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000359.

[45] E. Wang, Z. Shen, Lifecycle energy consumption prediction of residential buildings by incorporating longitudinal uncertainties, J. Civ. Eng. Manag. 19 (2014) S161–S171, https://doi.org/10.3846/13923730.2013.802744.
[46] N.K. Walgama Wellalage, T. Zhang, R. Dwight, K. El-Akruti, Bridge deterioration modeling by markov chain monte carlo (MCMC) simulation method, in: Springer International Publishing (Ed.), Proc. 8th World Congr. Eng. Asset Manag. (WCEAM 2013) 3rd Int. Conf. Util. Manag. Saf., Switzerland, 2015: pp. 545–556. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09507-3_47.
[47] J. McCarthy, F. Hegarty, J. Amoore, P. Blackett, R. Scott, Health technology asset management, in: Clin. Eng., Elsevier, 2020, pp. 17–30, 10.1016/B978-0-08-102694-6.00002-4.
[48] M. Alam, H. Shen, N. Asadizanjani, M. Tehranipoor, D. Forte, Impact of X-Ray Tomography on the Reliability of Integrated Circuits, IEEE Trans. Device Mater. Reliab. 17 (2017) 59–68, https://doi.org/10.1109/TDMR.2017.2656839.
[49] Z. Yousefli, F. Nasiri, O. Moselhi, Maintenance workflow management in hospitals: An automated multi-agent facility management system, J. Build. Eng. 32 (2020), 101431, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101431.
[50] D. Whelpton, Electro-medical servicing: Quality maintenance, J. Med. Eng. Technol. 2 (1978) 173–177, https://doi.org/10.3109/03091907809161789.
[51] M. Gómez-Chaparro, J. García-Sanz-Calcedo, J. Aunión-Villa, Maintenance in hospitals with less than 200 beds: efficiency indicators, Build. Res. Inf. 48 (2020) 526–537, https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1678007.
[52] S.-H. Sheu, C.-C. Chang, Y.-L. Chen, Z. George Zhang, Optimal preventive maintenance and repair policies for multi-state systems, Reliab. Eng. Syst. Saf. 140 (2015) 78–87, https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.03.029.
[53] J. González-Domínguez, G. Sánchez-Barroso, J. García-Sanz-Calcedo, Scheduling of Preventive Maintenance in Healthcare Buildings Using Markov Chain, Appl. Sci. 10 (2020) 5263, https://doi.org/10.3390/app10155263.
[54] OMS, Introducción al programa de mantenimiento de equipos médicos, 2012. http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44830/1/9789243501536_spa.pdf.
[55] A.M. Cruz, G.L. Haugan, A.M.R. Rincon, The effects of asset specificity on maintenance financial performance: An empirical application of Transaction Cost Theory to the medical device maintenance field, Eur. J. Oper. Res. 237 (2014) 1037–1053, https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.02.040.
[56] J. García-Sanz-Calcedo, N. de Sousa Neves, J.P.A. Fernandes, Assessment of the global warming potential associated with the construction process of healthcare centres, 174425912091433, J. Build. Phys. (2020), https://doi.org/10.1177/1744259120914333.
[57] M.N. Grussing, Risk-based facility management approachfor building components using a discrete markov process – predicting condition, reliability and remaining service life, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2015.
[58] R.S. Omar, S. Hashim, S.K. Ghoshal, D.A. Bradley, N.D. Shariff, Radiation dose assessment of 64 Multi-Slices Computed Tomography scanner, Radiat. Phys. Chem. (2020), 108904, https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108904.
[59] F. Badilla-Murillo, B. Vargas-Vargas, O. Víquez-Acuña, J. García-Sanz-Calcedo, Analysis of the Installed Productive Capacity in a Medical Angiography Room through Discrete Event Simulation, Processes 8 (2020) 660, https://doi.org/10.3390/pr8060660.
[60] J. Polisena, J.W. Jutai, R. Chreyh, A proposed framework to improve the safety of medical devices in a Canadian hospital context, Med. Devices Evid. Res. (2014) 139, https://doi.org/10.2147/MDER.S61728.
[61] J.I. Roig, A. Gómez, I. Romero, M.C. Carnero, Maintenance Policies Optimization of Medical Equipment in a Health Care Organization, in: 2019: pp. 143–157. https://doi.org/10.4018/978-1-5225-7489-7.ch012.

II. Libros y capítulos de libro

II.1 Recomendaciones de actuación para servicios técnicos en hospitales durante la crisis sanitaria por el Covid-19 (SARS-COV-2)

Libro: Recomendaciones de actuación para servicios técnicos en hospitales durante la crisis sanitaria por el Covid-19 (SARS-COV-2).

Capítulo: 4.1 Organización, procesos y personal (pág. 10-17)

Autores: C. Jiménez-Alonso, C. Vázquez-Cáceres. J. Aunión-Villa. I. Narváez-Jareño, D. Sánchez-Gallo, L. F. Talavera-Martín. L. A. Gómez-Delgado. B. Blanco-Burguillo, J. Rincón-Hernández. P. Blas-García. D. Sanz-Alemán, *et al.*

Promotores: Comisión de Ingeniería Médica y Sanitaria del COIIM y Asociación Española de Ingeniería Hospitalaria.

Editor: Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Madrid.

Año de publicación: 2020.

III. Participación en congresos

III.1 CFD applied to the design and optimization of hospital critical room air conditioning

Congreso: 5th International Conference on Technological Innovation in Buildings.

Organización: Departamento de Tecnología de la Edificación. Universidad Politécnica de Madrid.

Fecha: 25-27 de marzo de 2020.

Lugar de celebración: Madrid.

Autores: G. Sánchez-Barroso, J. González-Domínguez, M. Gómez-Chaparro, J. Aunión-Villa, F. Badilla-Murillo, Justo García Sanz-Calcedo.

Publicación: Proceedings 5th International Conference on Technological Innovation in Buildings.

Páginas: 111-112.

Año de publicación: 2020.

Editor: Universidad Politécnica de Madrid.

ISBN: 9788418255045.

Depósito Legal: M-4789-2020.

*III.2 P*revention and control of Legionella in water system in private hospitals

Congreso: 5th International Conference on Technological Innovation in Buildings.

Organización: Departamento de Tecnología de la Edificación. Universidad Politécnica de Madrid.

Fecha: 25-27 de marzo de 2020.

Lugar de celebración: Madrid.

Autores: M. Gómez-Chaparro, J. Aunión-Villa, J. González-Domínguez, G. Sánchez-Barroso, F. Badilla-Murillo, Justo García Sanz-Calcedo.

Publicación: Proceedings 5th International Conference on Technological Innovation in Buildings.

Páginas: 113-114.

Año de publicación: 2020.

Editor: Universidad Politécnica de Madrid.

ISBN: 9788418255045.

Depósito Legal: M-4789-2020.

*III.3 A*plicability of statistical techniques based on Markov chains in engineering

Congreso: 5th International Conference on Technological Innovation in Buildings.

Organización: Departamento de Tecnología de la Edificación. Universidad Politécnica de Madrid.

Fecha: 25-27 de marzo de 2020.

Lugar de celebración: Madrid.

Autores: J. González-Domínguez, G. Sánchez-Barroso, F. Badilla-Murillo, M. Gómez-Chaparro, J. Aunión-Villa, Justo García Sanz-Calcedo.

Publicación: Proceedings 5th International Conference on Technological Innovation in Buildings.

Páginas: 196-198.

Año de publicación: 2020.

Editor: Universidad Politécnica de Madrid.

ISBN: 9788418255045.

Depósito Legal: M-4789-2020.

III.4 Gamification through ICT questionnaires as a learning methodology in graphic expression subjects

Congreso: 4th International Conference of Educational Innovation in Building.

Organización: Departamento de Tecnología de la Edificación. Universidad Politécnica de Madrid.

Fecha: 25 de marzo a 8 de abril de 2020.

Lugar de celebración: Madrid.

Autores J.P. Carrasco-Amador; J.L. Canito-Lobo; G. Sánchez-Barroso;J. González-Domínguez; J. Aunión-Villa; F. Badilla-Murillo; J. García-Sanz-Calcedo.

Publicación: Proceedings 4th International Conference of Educational Innovation in Building.

Páginas: 65-66.

Año de publicación: 2020.

Editor: Universidad Politécnica de Madrid.

Depósito Legal: M-4788-2020.

III.5 Flipped learning methodology adapted for application in graphical engineering

Congreso: 4th International Conference of Educational Innovation in Building.

Organización: Departamento de Tecnología de la Edificación. Universidad Politécnica de Madrid.

Fecha: 25 de marzo a 8 de abril de 2020.

Lugar de celebración: Madrid.

Autores J.P. Carrasco-Amador; J.L. Canito-Lobo; G. Sánchez-Barroso;J. González-Domínguez; J. Aunión-Villa; F. Badilla-Murillo; J. García-Sanz-Calcedo.

Publicación: Proceedings 4th International Conference of Educational Innovation in Building.

Páginas: 67-68.

Año de publicación: 2020.

Editor: Universidad Politécnica de Madrid.

Depósito Legal: M-4788-2020.

III.6 Implementing project-based learning through BIM technology

Congreso: 4th International Conference of Educational Innovation in Building.

Organización: Departamento de Tecnología de la Edificación. Universidad Politécnica de Madrid.

Fecha: 25 de marzo a 8 de abril de 2020.

Lugar de celebración: Madrid.

Autores J.P. Carrasco-Amador; J.L. Canito-Lobo; G. Sánchez-Barroso; J. González-Domínguez; J. Aunión-Villa; F. Badilla-Murillo; J. García-Sanz-Calcedo.

Publicación: Proceedings 4th International Conference of Educational Innovation in Building.

Páginas: 59-60.

Año de publicación: 2020.

Editor: Universidad Politécnica de Madrid.

Depósito Legal: M-4788-2020.

III.7 Evaluation of the adquisition value of electromedical equipment in relation to infraestructure healthcare and energy consumption in hospitals

Congreso: 24th International Congress on Project Management and Engineering.

Organización: Asociación Española de Dirección e Ingeniería de Proyectos (AEIPRO).

Fecha: 7 al 10 de julio de 2020.

Lugar de celebración: Alcoy.

Autores J. Aunión-Villa, J. González-Domínguez, G. Sánchez-Barroso, J. García-Sanz-Calcedo, F. López-Rodríguez.

Publicación: Proceedings from the 24th International Congress on Project Management and Engineering.

Código: 10-007.

Año de publicación: 2020.

III.8 Application of the flipped learning methodology as a tool for educational innovation in project engineering

Congreso: 24th International Congress on Project Management and Engineering.

Organización: Asociación Española de Dirección e Ingeniería de Proyectos (AEIPRO).

Fecha: 7 al 10 de julio de 2020.

Lugar de celebración: Alcoy.

Autores G. Sánchez-Barroso, J. P. Carrasco-Amador, J. García-Sanz-Calcedo, F. Badilla-Murillo, J. Aunión-Villa.

Publicación: Proceedings from the 24th International Congress on Project Management and Engineering.

Código: 09-006.

Año de publicación: 2020.

III.9 Optimisation of CO2 emissions from the construction of healthcare buildings using 6D BIM technology

Congreso: 24th International Congress on Project Management and Engineering.

Organización: Asociación Española de Dirección e Ingeniería de Proyectos (AEIPRO).

Fecha: 7 al 10 de julio de 2020.

Lugar de celebración: Alcoy.

Autores G. Sánchez-Barroso, J. González-Domínguez, J. Aunión-Villa, J. García-Sanz-Calcedo, F. López-Rodríguez.

Publicación: Proceedings from the 24th International Congress on Project Management and Engineering.

Código: 05-004.

Año de publicación: 2020.

IV. Descripción de Proyecto de Investigación Industrial

IV.1 Evaluación de la gestión del acceso vascular

Dentro del contexto de esta tesis doctoral, el doctorando ha participado en un proyecto de investigación en calidad de ingeniero hospitalario en la Fundación de Investigación HM Hospitales. El proyecto se denomina "Evaluación del acceso vascular periférico".

El acceso vascular periférico

El acceso vascular periférico es un procedimiento clínico que consiste en la introducción de un catéter en un vaso sanguíneo arterial o venoso. El objetivo de este procedimiento es poder administrar líquidos y medicamentos y realizar transfusiones y extracciones de sangre, quimioterapia, etc. Es un procedimiento habitual en anestesia, oncología, diagnóstico por imagen, urgencias o unidades de cuidados intensivos.

Debido al uso rutinario que se hace de esta técnica, en ocasiones no se le da la relevancia que tiene, ya que se está accediendo de forma directa al flujo sanguíneo del paciente y ello puede conllevar problemas asociados, tales como la infección local o sistémica, trombosis venosa, flebitis o inflamación de la vena utilizada, infiltración o fuga de fluidos al tejido dando lugar a una administración ineficiente de medicamentos y/o extravasación al tejido celular subcutáneo.

Objetivos del proyecto

El objetivo general del proyecto es evaluar la práctica y los procesos actuales del acceso vascular periférico según las últimas recomendaciones acerca de la práctica clínica basada en la evidencia.

Se plantean cinco objetivos específicos que se describen a continuación

OBJ ESP1: Establecer una estandarización y normalización de cuidados del acceso vascular periférico

OBJ ESP2: Disminuir la variabilidad en la gestión del acceso vascular periférico en todos los hospitales del grupo.

OBJ ESP3: Promover y reforzar la cultura de seguridad del paciente en el personal que realiza el procedimiento.

OBJ ESP4: Resaltar y desarrollar metodologías para sostener y lograr la excelencia en la práctica de la terapia intravenosa de acceso vascular periférico.

OBJ ESP5: Analizar la influencia ambiental en la realización del procedimiento a través de los equipos de esterilización y climatización.

Fases del proyecto

1. Planificación: Los responsables de enfermería establecen las bases del proyecto y los objetivos y necesidades del Hospital.

2. Comunicación interna del proyecto: Se presenta el proyecto a todos los profesionales implicados para coordinar y facilitar el proceso de recogida de datos.

3. Recogida de datos: Se realiza la observación y evaluación de la práctica del acceso vascular periférico en las unidades seleccionadas.

4. Análisis y realización del informe: Se realiza el informe clínico y se presentan los resultados a los responsables, identificando las áreas de mejora.

5. Propuesta de un plan de acción: Se presenta el plan de acción basado en las áreas de mejora detectadas.

En proyecto se encuentra en junio de 2021 finalizando la fase 4.

Aporte de la Ingeniería Hospitalaria al proyecto

La inclusión en el proyecto de un perfil de Ingeniería Hospitalaria permite dar el apoyo técnico necesario sobre instalaciones de renovación de aire, consecución de ambientes limpios y equipos electromédicos usados en las diferentes zonas del hospital donde se realizan los procedimientos de acceso vascular periférico.

En los hospitales existen diferentes salas con distintos niveles de filtración y calidad del aire según el uso al que esté destinada. Los niveles más altos de esterilización y limpieza se consiguen en los quirófanos y unidades de cuidados intensivos, no obstante, el resto de zonas deben tener algún tipo de renovación y filtración de aire. Los niveles de temperatura y humedad son también factores relevantes para la proliferación de microorganismos en el aire y en superficies, por lo que se cuenta con una plataforma de registro de señales de temperatura y humedad en diferentes zonas del hospital. El aporte de información sobre el equipamiento electromédico ha resultado esencial tanto para el uso en el procedimiento de acceso como en el tratamiento de las consecuencias derivadas. La disponibilidad de los equipos y el estado de mantenimiento son responsabilidad del área de ingeniería del hospital, sin embargo, el conocimiento de las instrucciones de los equipos y el entrenamiento que debe tener el usuario para su uso es esencial para el desarrollo correcto de los procedimientos asistenciales.

Por lo tanto, la aportación desde el área de ingeniería resulta muy valiosa en este tipo de proyectos, ya que se tiende a poner el foco en la parte clínica y no se contemplan otros enfoques. La recogida de datos técnicos, análisis, discusión e inclusión en el informe final enriquece los resultados y ayuda a obtener conclusiones con un enfoque más multidisciplinar.

Tareas realizadas por el doctorando en el proyecto

Las tareas realizadas por el doctorando en esta investigación se enmarcan en el control de la calidad del aire en el momento de realización del acceso vascular y el control del equipamiento electromédico asociado a las complicaciones que puedan existir posteriormente. Antes de cada observación se ha revisado la infraestructura, instalaciones y equipamiento electromédico implicado, obteniendo los datos necesarios para su análisis posterior.

Calidad del aire

El control de la calidad del aire se ha realizado a través de cuatro parámetros: temperatura, humedad y número de renovaciones por hora y nivel de filtración. Los datos de temperatura y humedad han sido obtenidos por los sensores de medición continua existentes en la instalación de climatización. En aquellas zonas en las que no existía el sensor se ha usado un registrador portátil. Se han obtenido datos con un intervalo de 5 minutos.

El dato de número de renovaciones por hora y niveles de filtración se ha obtenido de la información de diseño de los proyectos de instalación y características de los equipos. Estos valores han sido validados posteriormente por otros equipos de medida como anemómetros y presostatos. El estado de la instalación se ha valorado a través de las acciones preventivas: revisiones programadas, limpiezas y cambio de filtros y de los correctivos realizados.

Se ha elaborado un informe de la calidad del aire por zonas y se han realizado recomendaciones técnicas y de usuario, que se han incluido en el estándar propuesto.

Equipamiento electromédico

Para cada zona del estudio se ha realizado análisis del equipamiento electromédico existente y la necesidad de determinados equipos. Particularmente se ha revisado la disponibilidad, distancia, ubicación y accesibilidad de pulsioxímetros, tensiómetros, desfibriladores, electrocardiógrafos, esterilizadores entre otros.

Se ha revisado el estado del equipamiento electromédico a través de la información registrada en la base de datos del *software* de gestión o GMAO con el fin del analizar el estado de mantenimiento y la fiabilidad de los equipos.

Se ha hecho una evaluación del conocimiento del usuario de los equipos electromédicos implicados con el fin de detectar carencias formativas.

El análisis anterior se ha reflejado en propuestas de accesibilidad y dimensionamiento del número de equipos electromédicos y propuestas de formación por grupos de usuario.