



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

SISTEMA DE MEJORA DE LA EFICIENCIA DE UN BLOQUE QUIRÚRGICO

AUTOR:

D. PABLO FERNÁNDEZ VALLEJO

TUTORES:

DR. D. JESÚS POZA CRESPO

DR. D. CARLOS GÓMEZ PEÑA

VALLADOLID, SEPTIEMBRE DE 2025

TÍTULO: **Sistema de mejora de la eficiencia
de un bloque quirúrgico**

AUTOR: **D. Pablo Fernández Vallejo**

TUTOR/ES: **Dr. D. Jesús Poza Crespo
Dr. D. Carlos Gómez Peña**

DEPARTAMENTO: **Teoría de la Señal y Comunicaciones e
Ingeniería Telemática**

TRIBUNAL

PRESIDENTE: **Dr. D. Jesús Poza Crespo**

SECRETARIO: **Dr. D. Carlos Gómez Peña**

VOCAL: **Dr. D. Javier Gómez Pilar**

SUPLENTE 1: **Dr. D. César Gutiérrez Tobal**

SUPLENTE 2: **Dr. Dña. María García Gadañón**

FECHA:

CALIFICACIÓN:

A mi familia

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a Jesús Poza Crespo y Carlos Gómez Peña, tutores de este Trabajo de Fin de Grado, por su implicación, su apoyo constante y su capacidad para guiar el proyecto. Su experiencia y conocimiento del ámbito sanitario, su visión aplicada de la ingeniería y su disposición para resolver dudas en todo momento han sido fundamentales para el desarrollo de este proyecto y para mi propio crecimiento profesional.

También deseo agradecer a Natalia Martín Cruz, tutora del Trabajo de Fin de Grado en Administración y Dirección de Empresas vinculado a este proyecto, por su orientación estratégica y su ayuda para integrar ambas perspectivas, técnica y de gestión, de forma coherente y complementaria.

Mi agradecimiento se extiende a Rodrigo Poves Álvarez, coordinador de quirófanos del Hospital Clínico Universitario de Valladolid (HCUV), y a Fernando Rodríguez Cabezero, Jefe de Servicio de Organización y Procesos, por su generosidad, su cercanía y su papel facilitador durante todo el proceso. Su conocimiento del entorno hospitalario y su disposición a colaborar han permitido que este trabajo mantenga en todo momento un enfoque realista, útil y alineado con las necesidades del entorno clínico.

Por último, gracias a todo el personal del HCUV que ha mostrado interés, ha compartido su experiencia y ha participado de alguna manera en el desarrollo del proyecto. Sin su colaboración, este trabajo no habría alcanzado el nivel de aplicabilidad práctica que se ha perseguido desde el inicio.

Resumen

Este Trabajo de Fin de Grado (TFG) forma parte de un proyecto más amplio que incluye también un TFG en Administración y Dirección de Empresas, y ha contado con la colaboración del Hospital Clínico Universitario de Valladolid (HCUV). El objetivo ha sido desarrollar una herramienta que mejore la programación quirúrgica y optimice la gestión del bloque quirúrgico, partiendo del conocimiento obtenido a través de entrevistas con profesionales del HCUV, donde se identificaron los principales retos del proceso actual. Para abordar esta problemática, se ha modelado el proceso de programación quirúrgica como un problema de optimización que refleja las restricciones clínicas y organizativas del entorno hospitalario. Posteriormente, este modelo se ha implementado en Python y se ha resuelto mediante el *solver* Gurobi, lo que ha permitido obtener soluciones eficientes en tiempos muy reducidos. Los resultados muestran que se alcanzan de forma sistemática eficiencias brutas de ocupación del bloque quirúrgico superiores al 97 %, con tiempos de ejecución del modelo de un minuto. Además, se ha analizado el comportamiento de los modelos bajo diferentes escenarios mediante simulaciones que varían parámetros como el horizonte temporal, la duración media de las intervenciones, su nivel de incertidumbre o la probabilidad de sobrepasar el horario disponible. El trabajo desarrollado no solo ha demostrado la viabilidad técnica del enfoque propuesto, sino que ha permitido sentar las bases de una herramienta práctica, rápida y precisa que puede integrarse en hospitales reales para mejorar la eficiencia operativa del bloque quirúrgico y facilitar la labor de los profesionales encargados de su organización.

Palabras clave

Algoritmo de optimización, bloque quirúrgico, eficiencia quirúrgica, Gurobi, modelos estocásticos, programación quirúrgica.

Abstract

This Final Degree Project is part of a broader initiative that also includes a Bachelor's Thesis in Business Administration. The project was carried out in collaboration with the *Hospital Clínico Universitario de Valladolid* (HCUV). Its main objective has been to develop a tool to improve surgical scheduling and optimize the surgical block management. This effort was guided, by insights gained through interviews with professionals from both the HCUV, which helped identify the key challenges in the current process. To address this issue, the surgical scheduling process was formulated as an optimization problem that incorporates the clinical and organizational constraints of the hospital environment. The model was implemented in Python and solved using the Gurobi optimizer, enabling the generation of efficient solutions in very short computation times. The results consistently show gross efficiency levels of the surgical block occupancy above 97 %, with runtimes of approximately one minute. Furthermore, the behavior of the models was analyzed through simulations under various scenarios, modifying parameters such as the planning horizon, average surgery duration, uncertainty level, and the probability of exceeding the scheduled operating time. This work has not only demonstrated the technical feasibility of the proposed approach but has also laid the groundwork for a practical, fast, and accurate tool that can be integrated into real hospital environments to enhance the operational efficiency of surgical blocks and support the daily work of healthcare professionals involved in their coordination.

Keywords

Gurobi, optimization algorithm, stochastic models, surgical block, surgical efficiency, surgical scheduling.

Índice General

Capítulo 1: Introducción, motivación y objetivos.....	14
1.1 Introducción.....	15
1.2 Motivación.....	16
1.3 Objetivos.....	17
1.4 Estructura del documento	18
Capítulo 2: Programación quirúrgica	20
2.1 Introducción.....	21
2.2 Conceptos y metodologías actuales	25
2.2.1 Conceptos	25
2.2.2 Metodologías actuales	27
2.3 Situación actual de la programación quirúrgica.....	29
2.3.1 Rendimiento de los quirófanos	29
2.3.2 Impacto económico	31
2.3.3 Herramientas actuales.....	33
Capítulo 3: Problemas de optimización.....	36
3.1 Introducción a los problemas de optimización	37
3.1.1 Métodos de resolución de un problema de optimización	38
3.2 Modelado del problema	40
3.3 Consideraciones para la programación quirúrgica.....	41
3.3.1 Optimización estocástica	41
3.3.2 Programación dinámica	41
Capítulo 4: Formulación matemática del problema	43
4.1 Introducción.....	44
4.2 Modelo base.....	44
4.2.1 Descripción del problema.....	44
4.2.2 Formulación matemática del modelo base	45
4.3 Modelo alternativo 1	48
4.3.1 Descripción del modelo alternativo 1	48
4.3.2 Formulación matemática del modelo alternativo 1	48
4.4 Modelo alternativo 2.....	49
4.4.1 Descripción del modelo alternativo 2.....	49
4.4.2 Formulación matemática del modelo alternativo 2	50

4.5	Modelo alternativo 3	50
4.5.1	Descripción del modelo alternativo 3	50
4.5.2	Formulación matemática del modelo alternativo 3	51
4.6	Modelo alternativo 4	51
4.6.1	Descripción del modelo alternativo 4	51
4.6.2	Formulación matemática del modelo alternativo 4	52
4.7	Modelo alternativo 5	54
4.7.1	Descripción del modelo alternativo 5	54
4.7.2	Formulación matemática del modelo alternativo 5	55
Capítulo 5: Descripción de la herramienta.....		56
5.1	Descripción general	57
5.1.1	Características y funcionalidades	57
5.2	Objetivos de la herramienta	58
5.3	Esquema funcional.....	59
5.3.1	Descripción del proceso de planificación.....	59
5.3.2	Diagrama de bloques de la herramienta	60
5.4	Requisitos	62
5.4.1	Requisitos funcionales.....	62
5.4.2	Requisitos no funcionales.....	63
5.5	Resolución del problema de optimización	64
5.5.1	Entorno de trabajo	64
5.5.2	Visualización de resultados	66
5.6	Interfaz gráfica desarrollada	68
Capítulo 6: Generación de datos sintéticos.....		74
6.1	Introducción.....	75
6.2	Definición de conjuntos	75
6.3	Definición de variables auxiliares.....	77
Capítulo 7: Resultados		80
7.1	Introducción	81
7.2	Explicación de los escenarios a analizar	81
7.3	Definición de indicadores de rendimiento	83
7.4	Comparativa general de modelos.....	85
7.5	Análisis de la influencia del número de quirófanos	86
7.6	Análisis de la influencia del número de días	89
7.7	Comparativa de modelos con baja saturación.....	91

7.8	Análisis de la influencia del tiempo de ejecución.....	92
7.9	Análisis del modelo 4 con distintos niveles de confianza.....	95
7.10	Análisis de la influencia del tiempo de rotación.....	97
7.11	Análisis de la influencia de la incertidumbre en la duración de las intervenciones.	100
7.12	Análisis de la influencia de la saturación.....	103
7.13	Análisis de la influencia de la duración media de las intervenciones	106
Capítulo 8: Discusión y limitaciones.....		108
8.1	Introducción.....	109
8.2	Discusión	109
8.2.1	Resultados propios.....	109
8.2.2	Comparativa con otros autores	125
8.3	Limitaciones	130
Capítulo 9: Conclusiones y líneas futuras.....		133
9.1	Introducción.....	134
9.2	Cumplimiento de los objetivos propuestos.....	134
9.3	Aportaciones originales	135
9.4	Conclusiones.....	136
9.5	Líneas futuras.....	138
Bibliografía		140

Índice de Figuras

Figura 1: Total de intervenciones quirúrgicas en España entre 2012 y 2021 en hospitales del Sistema Nacional de Salud, en hospitales privados y totales (Secretaría General de Salud Digital, Información e Innovación del Sistema Nacional de Salud , 2023).....	21
Figura 2: Intervenciones quirúrgicas por cada 1000 habitantes en España entre 2012 y 2021 en hospitales del Sistema Nacional de Salud, en hospitales privados y totales (Secretaría General de Salud Digital, Información e Innovación del Sistema Nacional de Salud , 2023).....	22
Figura 3: Evolución del número de pacientes en lista de espera quirúrgica en el SNS entre el primer semestre de 2006 y 2024 (Sistema Nacional de Salud, 2024).	23
Figura 4: Ratio de intervenciones por quirófano en España entre 2012 y 2021 en hospitales del Sistema Nacional de Salud, en hospitales privados y totales (Secretaría General de Salud Digital, Información e Innovación del Sistema Nacional de Salud , 2023).....	23
Figura 5: Evolución del tiempo medio de espera para someterse a una operación en el SNS entre el primer semestre de 2006 y 2024 (Sistema Nacional de Salud, 2024).	24
Figura 6: Diagrama de bloques del funcionamiento de la herramienta.....	60
Figura 7: Cronograma generado para el día 1.	68
Figura 8: Cronograma generado para el día 2.	68
Figura 9: Pantalla principal de la herramienta de apoyo a la organización quirúrgica.	70
Figura 10: Ventana del submenú de quirófanos de la herramienta de apoyo a la organización quirúrgica.	71
Figura 11: Ventana del submenú de personal de la herramienta de apoyo a la organización quirúrgica.	72
Figura 12: Pantalla principal de la herramienta de apoyo a la organización quirúrgica con 6 quirófanos disponibles.	73
Figura 13: Representación de la distribución log-normal de la duración quirúrgica (Gomes, et al., 2012).	78
Figura 14: Evolución de la eficiencia bruta agendada en las 100 simulaciones por modelo.	111
Figura 15: Evolución de la eficiencia bruta, neta, número de intervenciones y número de intervenciones por quirófano en función del nivel de confianza permitido.	118
Figura 16: Evolución del porcentaje de sesiones con sobreuso, tiempo medio de sobreuso y tiempo medio sin uso en función del nivel de confianza permitido.....	119
Figura 17: Gráfica con la diferencia en puntos porcentuales entre la eficiencia bruta y neta agendada para cada modelo en función del tiempo de rotación.	120

Índice de Tablas

Tabla 1: Índices y conjuntos del modelo.	45
Tabla 2: Variables auxiliares del modelo.	45
Tabla 3: Variables de decisión del modelo.	46
Tabla 4: Nueva variable de decisión del modelo alternativo 1.	48
Tabla 5: Nuevos índices y conjuntos del modelo alternativo 2.	50
Tabla 6: Nuevas variables auxiliares del modelo alternativo 2.	50
Tabla 7: Nueva variable auxiliar del modelo alternativo 3.	51
Tabla 8: Valores obtenidos de la variable de decisión X_{pqd}	66
Tabla 9: Valores obtenidos de la variable de decisión Z_{cqd}	67
Tabla 10: Resumen de la agenda quirúrgica generada.	67
Tabla 11: Parámetros utilizados para la simulación general.	85
Tabla 12: Resultados medios obtenidos para cada modelo en la simulación general (200 % de demanda, 6 quirófanos, 10 días, 1 min de ejecución).	86
Tabla 13: Parámetros utilizados para el análisis de la influencia del número de quirófanos.	87
Tabla 14: Resultados medios obtenidos para cada modelo en el análisis de la influencia del número de quirofanos (200 % de demanda, 2, 4 y 6 quirófanos, 5 días, 1 min de ejecución).	88
Tabla 15: Parámetros utilizados para el análisis de la influencia del horizonte temporal.	89
Tabla 16: Resultados medios obtenidos para cada modelo en el análisis de la influencia del horizonte temporal (200 % de demanda, 6 quirófanos, 1, 3 y 5 días, 1 min de ejecución).	90
Tabla 17: Parámetros utilizados para la simulación con sobreoferta.	91
Tabla 18: Resultados medios obtenidos para cada modelo con sobreoferta (50 % de demanda, 6 quirófanos, 5 días, 1 min de ejecución).	91
Tabla 19: Parámetros utilizados para el análisis de la influencia del tiempo de ejecución.	92
Tabla 20: Resultados medios obtenidos para cada modelo en el análisis del tiempo de ejecución (200 % de demanda, 6 quirófanos, 5 días, 1, 3, 6 y 10 min de ejecución) (parte 1).	93
Tabla 21: Resultados medios obtenidos para cada modelo en el análisis de la influencia del tiempo de ejecución (200 % de demanda, 6 quirófanos, 5 días, 1, 3, 6 y 10 min de ejecución) (parte 2).	94
Tabla 22: Parámetros utilizados para el análisis de la influencia del nivel de confianza.	95

Tabla 23: Resultados medios obtenidos para el modelo 4 con distintos niveles de confianza (200 % de demanda, 6 quirófanos, 5 días, 1 min de ejecución).....	96
Tabla 24: Parámetros utilizados para el análisis de la influencia del tiempo de rotación.	97
Tabla 25: Resultados medios obtenidos para cada modelo en el análisis de la influencia del tiempo de rotación (200 % de demanda, 6 quirófanos, 5 días, 1 min de ejecución) (parte 1).....	98
Tabla 26: Resultados medios obtenidos para cada modelo en el análisis de la influencia del tiempo de rotación (200 % de demanda, 6 quirófanos, 5 días, 1 min de ejecución) (parte 2).....	99
Tabla 27: Parámetros utilizados para el análisis de la influencia de la incertidumbre en la duración de las intervenciones.....	100
Tabla 28: Resultados medios obtenidos para cada modelo en el análisis de la influencia de la incertidumbre en la duración de las intervenciones (200 % de demanda, 6 quirófanos, 5 días, 1 min de ejecución) (parte 1).	101
Tabla 29: Resultados medios obtenidos para cada modelo en el análisis de la influencia de la incertidumbre en la duración de las intervenciones (200 % de demanda, 6 quirófanos, 5 días, 1 min de ejecución) (parte 2).	102
Tabla 30: Parámetros utilizados para el análisis de la influencia de la saturación.	103
Tabla 31: Resultados medios obtenidos para cada modelo en el análisis de la influencia del grado de saturación (6 quirófanos, 5 días, 1 min de ejecución) (parte 1).....	104
Tabla 32: Resultados medios obtenidos para cada modelo en el análisis de la influencia del grado de saturación (6 quirófanos, 5 días, 1 min de ejecución) (parte 2).....	105
Tabla 33: Resultados medios obtenidos para cada modelo en el análisis de la influencia de la duración media de las intervenciones (200 % de demanda, 6 quirófanos, 5 días, 1 min de ejecución).....	107
Tabla 34: Varianza y desviación típica de la eficiencia bruta agendada por modelo..	112
Tabla 35: Desviación típica de los distintos indicadores de rendimiento por modelo.	112
Tabla 36: Diferencia en puntos porcentuales entre la eficiencia bruta y neta agendada para cada modelo en función del tiempo de rotación.	120

Capítulo 1: Introducción, motivación y objetivos

1.1	Introducción.....	15
1.2	Motivación.....	16
1.3	Objetivos.....	17
1.4	Estructura del documento	18

1.1 Introducción

La programación de intervenciones quirúrgicas es una de las tareas más complejas y críticas dentro de la gestión hospitalaria (Cardoen, et al., 2010). Su correcto desarrollo incide directamente sobre la eficiencia operativa del bloque quirúrgico, el aprovechamiento de los recursos disponibles y, en última instancia, sobre la calidad asistencial percibida por los pacientes (May, et al., 2011). A pesar de su relevancia, este proceso se realiza aún en muchos hospitales de forma manual, sin el apoyo de herramientas técnicas especializadas, lo que conlleva una elevada carga de trabajo administrativo, posibles errores en la programación y una limitada capacidad de respuesta ante imprevistos (Zhu, et al., 2019).

Con el fin de entender en profundidad esta problemática, se ha llevado a cabo un estudio preliminar basado en entrevistas en profundidad con profesionales del Hospital Clínico Universitario de Valladolid (HCUV) directamente implicados en la organización del bloque quirúrgico. Este trabajo, desarrollado en el marco del Trabajo de Fin de Grado (TFG) en Administración y Dirección de Empresas (ADE) del autor, ha permitido identificar las principales limitaciones del sistema actual, así como los requisitos funcionales y expectativas que los usuarios potenciales tendrían respecto a una solución técnica de apoyo. A partir de esta información se ha conceptualizado una herramienta orientada a mejorar la programación quirúrgica, diseñada con el objetivo de maximizar el uso de los quirófanos, optimizar la asignación de intervenciones y facilitar la labor de los coordinadores quirúrgicos.

El presente trabajo se centra en la vertiente técnica de esa herramienta, desarrollando un sistema de apoyo basado en técnicas de optimización matemática. En concreto, se modela el proceso de programación quirúrgica como un problema de optimización que recoge las restricciones clínicas y organizativas propias del entorno hospitalario. Este modelo se implementa en Python y se resuelve mediante el *solver* Gurobi, lo que permite obtener soluciones de alta calidad en tiempos muy reducidos. Sobre esta base, se desarrolla un modelo inicial (modelo base) y una serie de modelos alternativos, cada uno de ellos incorporando modificaciones orientadas a mejorar el rendimiento global o a representar con mayor fidelidad el contexto real del entorno quirúrgico.

Una vez implementados, los distintos modelos se evalúan mediante simulaciones diseñadas para reproducir distintos escenarios posibles dentro del bloque quirúrgico. Para ello, se recurre a la generación de datos sintéticos a partir de distribuciones estadísticas ampliamente utilizadas en la literatura especializada, dada la ausencia de bases de datos clínicas reales (Landa, et al., 2016). Estas simulaciones permiten analizar el comportamiento de los modelos bajo diferentes condiciones, como variaciones en el

horizonte temporal, la duración media de las intervenciones, el tiempo de limpieza entre cirugías o el nivel de incertidumbre asociado a cada operación. A través de estos análisis se identifican patrones comunes, fortalezas y limitaciones de cada modelo, contribuyendo a una comprensión más profunda de su funcionamiento.

En conjunto, el trabajo combina un enfoque práctico, basado en el conocimiento de los profesionales del entorno quirúrgico, con una aproximación técnica rigurosa, propia del ámbito de la ingeniería. El objetivo último ha sido diseñar una herramienta funcional, precisa y adaptable, que no solo optimice la utilización de los recursos hospitalarios, sino que resulte útil y viable para su uso real en entornos clínicos complejos. Este trabajo sienta así las bases para futuras fases de desarrollo e implementación de la herramienta, entre las que se incluyen la incorporación de módulos de localización, la integración de sistemas de predicción basados en inteligencia artificial y el diseño de una interfaz gráfica adaptada a las necesidades de los usuarios finales.

1.2 Motivación

Este trabajo nace de la voluntad de aplicar los conocimientos adquiridos durante la formación en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación a un problema real, y de explorar sinergias con el TFG en ADE, con el objetivo de abordar un mismo proceso desde perspectivas complementarias, técnica y organizativa, que permitan una comprensión más completa y una solución más efectiva.

La posibilidad de colaborar con el HCUV, una institución sanitaria de referencia cuyo funcionamiento se enfrenta a desafíos estructurales y organizativos comunes en este tipo de entornos complejos, surge a partir de una serie de contactos mantenidos con profesionales del centro, cuyas aportaciones fueron recogidas y analizadas en el marco del TFG del Grado en ADE del autor. A través de entrevistas en profundidad y reuniones con distintos perfiles del ámbito clínico y de gestión, se exploraron diversas líneas de colaboración.

Finalmente, se optó por focalizar el proyecto en la optimización de la programación quirúrgica, al detectar un margen de mejora significativo en la asignación de los recursos quirúrgicos, así como en la organización de las intervenciones, y al considerarse una necesidad prioritaria y una oportunidad de aplicar herramientas matemáticas avanzadas.

La complejidad inherente a la programación de las intervenciones quirúrgicas, unida a las limitaciones de los sistemas actuales basados en la experiencia y en herramientas generalistas, justifica la búsqueda de soluciones técnicas más robustas

(Samudra, et al., 2016). En este sentido, las técnicas de optimización se presentan como instrumentos idóneos para abordar este tipo de problemas (Abdalkareem, et al., 2021). Su capacidad para integrar múltiples restricciones y ofrecer soluciones objetivas y reproducibles permite avanzar hacia una toma de decisiones más eficiente y alineada con los objetivos estratégicos de la institución sanitaria.

Este enfoque técnico se complementa con el análisis organizativo realizado en el TFG de ADE, generando una sinergia entre ambos trabajos. Mientras que dicho trabajo se centró en la identificación de resistencias al cambio, el análisis de grupos de interés y la propuesta de estrategias para la implantación efectiva de una nueva herramienta de gestión quirúrgica, el presente trabajo desarrolla y evalúa el modelo técnico que podría sustentar dicha herramienta. Esta doble aproximación permite ofrecer una visión integral del problema, abarcando tanto su dimensión técnica como organizativa, lo que refuerza la viabilidad y el impacto potencial de la solución propuesta.

1.3 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es **diseñar, desarrollar y validar una herramienta técnica basada en modelos de optimización que contribuya a mejorar la programación quirúrgica en un entorno hospitalario real**; se busca modelar este proceso como un problema de optimización, con el fin de avanzar hacia una asignación de intervenciones quirúrgicas más eficiente, rápida y ajustada a los recursos del sistema sanitario.

Para alcanzar este objetivo general, se plantean varios objetivos específicos:

- **OE1.** Realizar una revisión bibliográfica sobre el estado del arte en la programación quirúrgica, identificando las metodologías empleadas y las herramientas disponibles en el mercado para abordar este problema.
- **OE2.** Formular un modelo base del problema de programación quirúrgica, incorporando los elementos fundamentales del sistema: quirófanos, profesionales disponibles, duración estimada de las intervenciones, prioridades clínicas y ventanas temporales.
- **OE3.** Desarrollar variantes del modelo inicial que incorporen mayor realismo o permitan mejorar el rendimiento y la aplicabilidad práctica de las soluciones obtenidas.

- **OE4.** Implementar y resolver los modelos formulados utilizando el *solver* Gurobi, analizando tanto su rendimiento computacional como la calidad de las soluciones generadas.
- **OE5.** Diseñar y ejecutar distintos escenarios de simulación que permitan validar los modelos propuestos mediante indicadores de rendimiento del bloque quirúrgico, como la ocupación de quirófanos, el número de intervenciones programadas o el cumplimiento del horario previsto.
- **OE6.** Analizar y discutir los resultados obtenidos, comparándolos con estudios previos, con el fin de valorar la aportación del modelo propuesto y su posicionamiento respecto a otras aproximaciones existentes.

Otro de los objetivos clave del proyecto es abordar el problema desde una perspectiva integral, considerando tanto los aspectos técnicos como los humanos y organizativos que condicionan el éxito de cualquier proyecto de este tipo. Este objetivo se trata principalmente en el TFG en ADE, con el que este trabajo mantiene una estrecha vinculación.

1.4 Estructura del documento

El documento está formado por 8 capítulos, cuya estructura es la siguiente:

- **Capítulo 1. Introducción, motivación y objetivos.** En este primer capítulo se presenta el contexto del trabajo, introduciendo los fundamentos y la motivación que justifican su desarrollo. Asimismo, se exponen los objetivos principales que se persiguen con él.
- **Capítulo 2. Programación quirúrgica.** En este capítulo se analizan los conceptos fundamentales de la programación quirúrgica y las metodologías actuales aplicadas en este ámbito. También se revisa la situación actual de los quirófanos, evaluando su rendimiento, impacto económico y las herramientas disponibles en la actualidad.
- **Capítulo 3. Problemas de optimización.** En este capítulo se introducen los principales aspectos de los problemas de optimización y las distintas técnicas de resolución.
- **Capítulo 4. Formulación matemática del problema.** En este capítulo se presenta en detalle la formulación matemática del problema de programación quirúrgica. Se desarrolla un modelo base y se proponen distintos modelos

alternativos, describiendo sus características, formulación y mejoras respecto al enfoque inicial.

- **Capítulo 5. Descripción de la herramienta.** En este capítulo se describe la herramienta desarrollada para la programación quirúrgica. Se exponen sus funcionalidades, requisitos y esquema de funcionamiento, así como la integración con los modelos de resolución del problema de optimización y la visualización de resultados.
- **Capítulo 6. Generación de datos sintéticos.** Este capítulo detalla el procedimiento seguido para la creación de los conjuntos de datos sintéticos utilizados en las simulaciones. Se definen tanto los conjuntos de instancias como las variables auxiliares necesarias para representar adecuadamente el problema.
- **Capítulo 7. Resultados.** En este capítulo se presentan los resultados obtenidos al aplicar los diferentes modelos propuestos en una variedad de escenarios, utilizando para ello un conjunto de indicadores de rendimiento que permiten evaluar y comparar su comportamiento. Algunos de los escenarios implican variar parámetros que influyen en la programación quirúrgica, como el número de quirófanos, la saturación de la demanda o la duración de las intervenciones, y se discuten las principales limitaciones del enfoque planteado.
- **Capítulo 8. Discusión y limitaciones.** En este capítulo se comentan los resultados obtenidos en el capítulo anterior, y se comparan dichos resultados con los hallazgos reportados en la literatura científica, con el fin de valorar en qué medida los modelos desarrollados se alinean o difieren de los enfoques existentes, reflexionando además sobre el alcance real del trabajo y su aportación dentro del marco más amplio de la investigación en programación quirúrgica. Finalmente, se señalan las limitaciones detectadas en el proceso de diseño y validación de la herramienta.
- **Capítulo 8. Conclusiones y líneas futuras.** En el último capítulo se resumen las principales conclusiones del trabajo, destacando las aportaciones originales realizadas y el grado de cumplimiento de los objetivos marcados. Asimismo, se plantean posibles líneas futuras de investigación y desarrollo que permitan ampliar y mejorar el enfoque propuesto.

Capítulo 2: Programación quirúrgica

2.1	Introducción	21
2.2	Conceptos y metodologías actuales	25
2.2.1	Conceptos	25
2.2.2	Metodologías actuales	27
2.3	Situación actual de la programación quirúrgica.....	29
2.3.1	Rendimiento de los quirófanos	29
2.3.2	Impacto económico	31
2.3.3	Herramientas actuales.....	33

2.1 Introducción

Los quirófanos constituyen uno de los recursos más críticos dentro de cualquier institución hospitalaria, ya que concentran una parte importante de la actividad asistencial, tecnológica y profesional (Harders, et al., 2006). Se tratan de espacios especialmente acondicionados para la práctica de intervenciones quirúrgicas, diseñados para garantizar condiciones óptimas de seguridad, asepsia y eficiencia durante su realización (Divatia & Ranganathan, 2015). La actividad que se desarrolla en ellos tiene un impacto directo sobre la salud y la calidad de vida de los pacientes, pero también sobre la eficiencia operativa del hospital, su sostenibilidad financiera y su imagen pública (Overdyk, et al., 1998).

La evolución del número de intervenciones quirúrgicas realizadas en España durante la última década pone de manifiesto la creciente demanda de servicios quirúrgicos en el país. Tal como muestran los datos recogidos en la Figura 1, el volumen total de intervenciones ha experimentado un crecimiento sostenido entre 2012 y 2021, tanto en hospitales del Sistema Nacional de Salud (SNS) como en hospitales privados. Esta tendencia se ve únicamente interrumpida en el año 2020, coincidiendo con el impacto de la pandemia de COVID-19, que obligó a una drástica reorganización de los recursos hospitalarios y a la suspensión temporal de buena parte de la actividad quirúrgica programada (Pariente, et al., 2009).

El análisis de la ratio de intervenciones quirúrgicas por cada 1.000 habitantes en ese mismo periodo (Figura 2) permite reforzar esta interpretación, al evidenciar cómo el acceso a la cirugía por parte de la población ha ido incrementándose de manera paulatina,

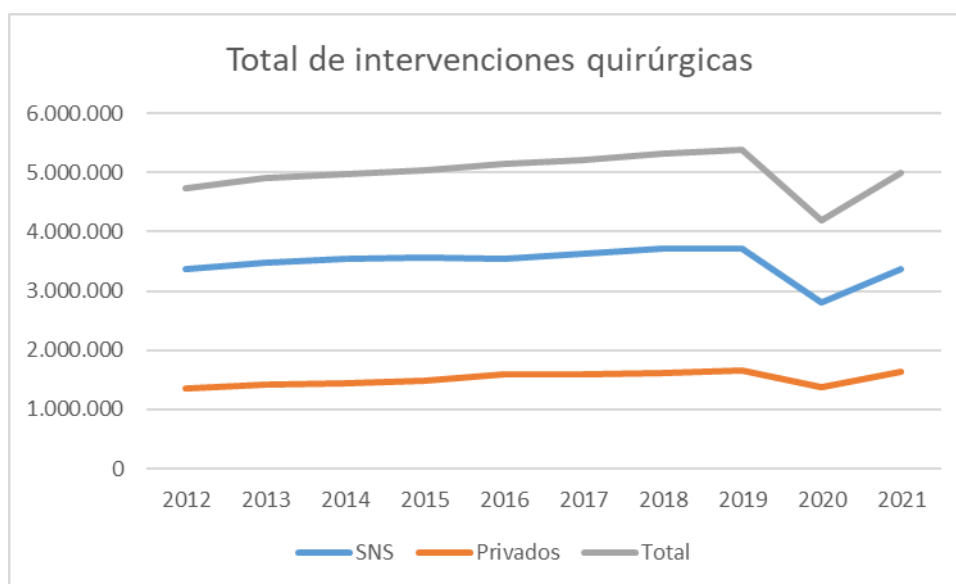


Figura 1: Total de intervenciones quirúrgicas en España entre 2012 y 2021 en hospitales del Sistema Nacional de Salud, en hospitales privados y totales (Secretaría General de Salud Digital, Información e Innovación del Sistema Nacional de Salud, 2023).

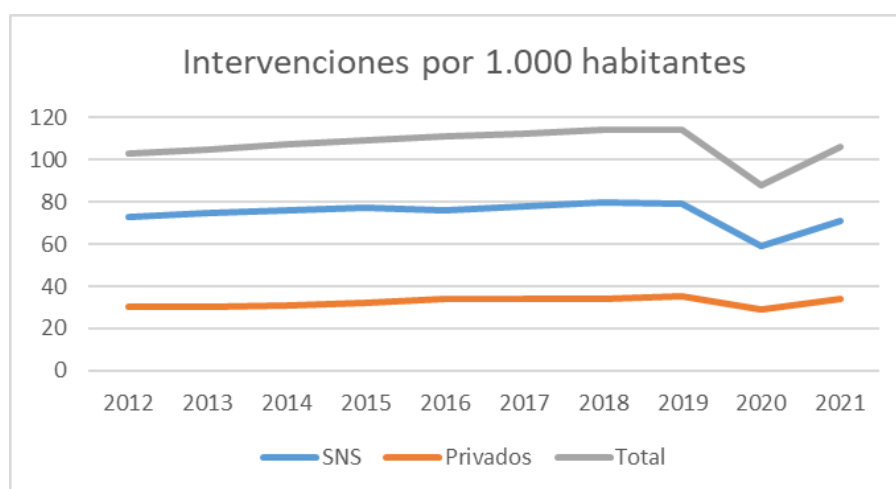


Figura 2: Intervenciones quirúrgicas por cada 1000 habitantes en España entre 2012 y 2021 en hospitales del Sistema Nacional de Salud, en hospitales privados y totales (Secretaría General de Salud Digital, Información e Innovación del Sistema Nacional de Salud , 2023).

en respuesta tanto al envejecimiento de la población como a la mejora en las técnicas diagnósticas y terapéuticas (Albareda, et al., 2017). Como señalan diversos estudios, el incremento de la esperanza de vida y la mayor prevalencia de enfermedades crónicas están contribuyendo a una mayor necesidad de intervenciones quirúrgicas, especialmente en la población de mayor edad, que requieren una atención oportuna para evitar complicaciones que derivan en costes asistenciales más elevados y que, por tanto, afectan a la sostenibilidad del sistema sanitario a largo plazo (Cedr s, 2024).

Por otra parte, la Figura 4 muestra la evolución del número de intervenciones por quirófano, un indicador usado para evaluar la eficiencia en el uso de estos recursos. Esta métrica calcula el número medio de intervenciones realizadas en cada quirófano a lo largo del año, reflejando no solo el volumen de actividad quirúrgica, sino también el grado de aprovechamiento de las infraestructuras y del personal sanitario disponible. Un valor elevado para este indicador sugiere un uso eficiente del espacio y del personal, mientras que un valor más bajo puede indicar tiempos muertos elevados, problemas de programación o ineficiencias en la gestión del flujo de pacientes. Tal como se ha observado en las Figura 1 y Figura 2, el número total de intervenciones quirúrgicas ha aumentado de forma constante durante la última década. Sin embargo, al analizar conjuntamente estos datos con los de la Figura 4, se aprecia que la ratio de intervenciones por quirófano en los hospitales del SNS se ha mantenido prácticamente constante, mientras que en los hospitales privados ha experimentado un notable incremento. Esto sugiere que el aumento global de la actividad quirúrgica ha sido absorbido, en buena medida, por el sector privado.

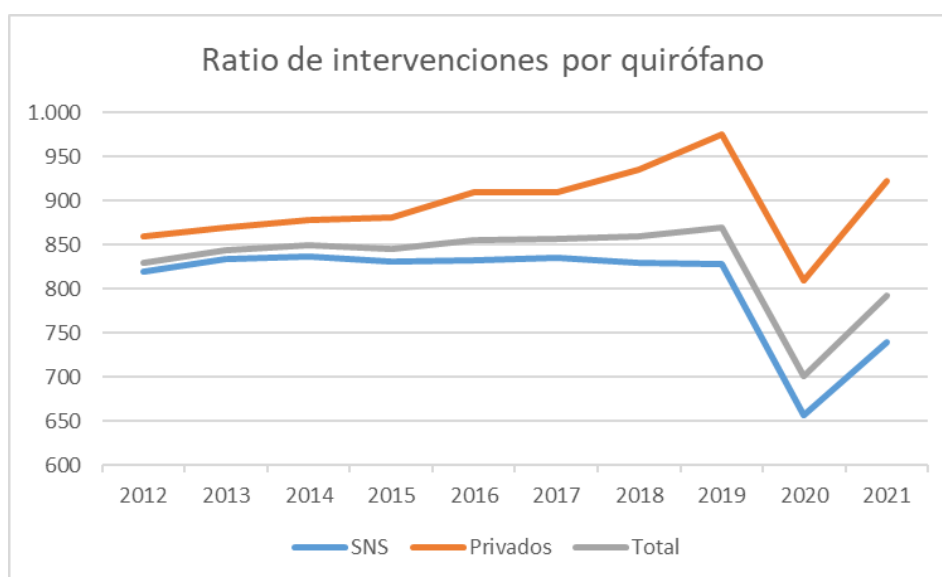


Figura 4: Ratio de intervenciones por quirófano en España entre 2012 y 2021 en hospitales del Sistema Nacional de Salud, en hospitales privados y totales (Secretaría General de Salud Digital, Información e Innovación del Sistema Nacional de Salud, 2023).

A pesar de tratarse de un elemento fundamental en el ecosistema sanitario, persiste un evidente desajuste entre la oferta y la demanda de intervenciones quirúrgicas. Esta discrepancia se traduce en uno de los principales síntomas de ineficiencia quirúrgica: el crecimiento sostenido de las listas de espera, consideradas como uno de los indicadores clave del rendimiento del sistema sanitario (Lee, et al., 2019). Como muestra la Figura 3, el número de pacientes en lista de espera quirúrgica en los hospitales del Sistema Nacional de Salud se ha incrementado en más de un 123 % entre el primer semestre de 2006 y el año 2024, según los registros oficiales. Este aumento refleja las dificultades estructurales del sistema para absorber la demanda creciente de procedimientos quirúrgicos.



Figura 3: Evolución del número de pacientes en lista de espera quirúrgica en el SNS entre el primer semestre de 2006 y 2024 (Sistema Nacional de Salud, 2024).

No obstante, el volumen de personas en lista de espera no permite, por sí solo, valorar adecuadamente la magnitud del problema. Para una interpretación más precisa, resulta imprescindible considerar también el tiempo medio de espera para acceder a una intervención quirúrgica. En este sentido, la Figura 5 muestra la evolución de este indicador entre 2006 y 2024, revelando una tendencia oscilante pero claramente orientada al alza en los últimos años. Esta prolongación en los plazos de espera agrava el impacto negativo sobre los pacientes, al aumentar el riesgo de deterioro clínico y la ansiedad asociada a la incertidumbre del tratamiento. Asimismo, pone de manifiesto las limitaciones del sistema sanitario para gestionar de manera eficiente sus recursos quirúrgicos.

En este contexto de creciente demanda y presión asistencial, resulta evidente que una programación quirúrgica eficiente no solo es deseable, sino imprescindible. La adecuada programación de las intervenciones puede generar beneficios significativos, tanto tangibles como intangibles, que repercuten directamente en la calidad de la atención prestada (Dexter & Epstein, 2005). Una gestión optimizada permite reducir los tiempos de espera, lo que contribuye a disminuir la ansiedad de los pacientes y a evitar complicaciones derivadas de intervenciones tardías. Al mismo tiempo, favorece un mayor aprovechamiento de los recursos humanos y materiales, lo que se traduce en una reducción de los costes operativos y una mejora en los indicadores de productividad del hospital.



Figura 5: Evolución del tiempo medio de espera para someterse a una operación en el SNS entre el primer semestre de 2006 y 2024 (Sistema Nacional de Salud, 2024).

No obstante, el bloque quirúrgico¹ es una de las áreas más complejas de gestionar dentro de un hospital (Romero García, et al., 2015). La coordinación de personal médico altamente especializado, la disponibilidad de equipos quirúrgicos y quirófanos, la gestión de prioridades de pacientes y la gestión de emergencias son solo algunos de los numerosos desafíos implicados en la programación quirúrgica (Gómez-Ríos, et al., 2019).

Aún más desafiante resulta el hecho de que la programación de los quirófanos debe realizarse en un entorno de incertidumbre en el que las cirugías no siempre se ajustan a la duración estimada y pueden producirse imprevistos que obliguen a modificar el plan previsto (Riahi, et al., 2023). Estas desviaciones pueden provocar retrasos acumulativos en las intervenciones programadas o, en casos más graves, la cancelación de operaciones planificadas en la misma jornada (Gómez-Ríos, et al., 2019).

Estos factores, unidos a la necesidad de garantizar una atención segura y eficaz, despiertan la necesidad de desarrollar herramientas avanzadas de apoyo a la toma de decisiones que permitan abordar la complejidad de este proceso de forma estructurada y eficiente.

2.2 Conceptos y metodologías actuales

2.2.1 Conceptos

En el subapartado anterior se ha introducido de manera general la relevancia de la programación quirúrgica dentro del contexto hospitalario. Sin embargo, hasta el momento no se ha ofrecido una definición precisa de este concepto, ni se han abordado en detalle otros términos que, si bien se utilizan habitualmente para hablar de la organización del bloque quirúrgico, presentan diferencias en su alcance y significado. Todos ellos pueden entenderse como procesos interrelacionados, que forman parte del ciclo de funcionamiento del bloque quirúrgico, desde la planificación a largo plazo hasta la ejecución operativa diaria. En la práctica, términos como planificación quirúrgica, programación quirúrgica, gestión del bloque quirúrgico u organización del bloque quirúrgico suelen utilizarse de forma indistinta, aunque es importante distinguirlos para entender con claridad el funcionamiento de esta área compleja del hospital.

¹ El bloque quirúrgico constituye el espacio del hospital que integra el conjunto de quirófanos, así como los espacios de apoyo, instalaciones y equipamiento necesarios para la realización de intervenciones quirúrgicas. Desde una perspectiva organizativa, se entiende como una estructura funcional en la que colabora un equipo multidisciplinar de profesionales para prestar atención quirúrgica especializada. Quedan fuera de esta definición otros entornos como las consultas de cirugía menor, las salas de endoscopia o las unidades de hemodinámica y electrofisiología (Ministerio de Sanidad y Política Social, 2009).

La planificación quirúrgica corresponde a un nivel estratégico y de medio-largo plazo. Su objetivo principal es determinar cómo se distribuirá el tiempo disponible en los quirófanos entre los distintos servicios quirúrgicos del hospital², estableciendo qué días y en qué turnos dispondrá cada servicio de acceso a los quirófanos para desarrollar su actividad (Gómez-Ríos, et al., 2019). Esta fase no contempla casos individuales de pacientes, sino que establece un marco general de funcionamiento que orienta la actividad futura.

Por su parte, la programación quirúrgica se sitúa en un nivel más operativo y cercano a la realidad diaria del hospital. Consiste en organizar, distribuir y secuenciar de forma concreta las intervenciones quirúrgicas de los pacientes, asignándoles fecha, hora, quirófano y equipo quirúrgico (Romero García, et al., 2015). En este proceso intervienen numerosos condicionantes, como la disponibilidad de los profesionales, la duración estimada de cada intervención, las características clínicas de los pacientes y los recursos tecnológicos requeridos. El objetivo principal es optimizar el uso de los recursos disponibles y garantizar la continuidad asistencial.

La gestión del bloque quirúrgico alude a la administración de los recursos materiales, humanos y organizativos que conforman este espacio hospitalario. Su función es asegurar que la actividad quirúrgica se desarrolle conforme a lo planificado y programado (Gancedo, 2022). Esta gestión incluye aspectos como la logística del flujo de pacientes, la coordinación entre equipos o el mantenimiento de la infraestructura y el equipamiento.

En este marco conceptual, puede hablarse de la organización del bloque quirúrgico como un término paraguas que engloba todas las acciones, estructuras y procesos vinculados a la planificación, programación y gestión del área quirúrgica. Esta visión integral permite analizar la actividad del bloque quirúrgico desde una perspectiva global, considerando tanto las decisiones estratégicas como su ejecución operativa.

En este trabajo, se abordará específicamente la programación quirúrgica, entendida como el proceso de asignar intervenciones concretas en función de los recursos disponibles y las necesidades asistenciales. No obstante, cabe señalar que la herramienta de apoyo que se propone en este proyecto está concebida para dar soporte al proceso

² Dentro del entorno hospitalario, un servicio quirúrgico se define como una unidad especializada que reúne a los profesionales sanitarios, los recursos y las actividades vinculadas a una determinada especialidad quirúrgica, como puede ser cirugía general, traumatología, urología o cirugía cardíaca. Cada uno de estos servicios está dirigido por un Jefe de Servicio, cuya función principal es coordinar la actividad asistencial, supervisar al equipo médico y participar activamente en la programación de las intervenciones que se llevarán a cabo en el bloque quirúrgico.

completo de organización del bloque quirúrgico, integrando los distintos procesos y facilitando una toma de decisiones más informada y eficiente.

2.2.2 Metodologías actuales

Una vez definidos los conceptos relacionados con la organización del bloque quirúrgico, este apartado se centra en las estrategias actuales empleadas en el proceso de programación quirúrgica, entendido como la asignación concreta de cada intervención a un quirófano, en una fecha y franja horaria determinada.

Este proceso constituye una fase crítica dentro del ciclo quirúrgico, ya que no solo implica coordinar recursos físicos y humanos, sino también responder de forma eficaz a las necesidades clínicas de los pacientes. Así, la programación no se limita a una mera distribución temporal de procedimientos, sino que persigue múltiples objetivos: por un lado, optimizar el uso del tiempo disponible en quirófano y reducir al mínimo los periodos de inactividad, que representan un elevado coste para la institución sanitaria; por otro, garantizar que los pacientes sean atendidos según criterios de urgencia y gravedad, velando por su seguridad clínica y por la calidad de la atención. Además, una programación optimizada contribuye a reducir los tiempos de espera para cirugía. En última instancia, se busca asegurar que los recursos limitados del bloque quirúrgico se utilicen de forma racional y sostenible (Van Oostrum, et al., 2008).

Actualmente, en el ámbito hospitalario coexisten principalmente dos grandes estrategias para la programación de las intervenciones quirúrgicas: la programación abierta y la programación por horarios reservados (Magerlein & Martin, 1978). Ambas presentan enfoques distintos en cuanto a la asignación de tiempos de quirófano y el grado de flexibilidad o control que otorgan a los servicios quirúrgicos.

La **programación abierta (*Open Scheduling*)** es una estrategia en la que los quirófanos permanecen disponibles sin una asignación previa fija para ninguna especialidad o profesional (Kopach, et al., 2007). En este sistema, los servicios quirúrgicos reservan tiempo quirúrgico a medida que lo necesitan, normalmente según el orden de solicitud (*first-come, first-served*), sin que existan restricciones estrictas respecto al uso de cada quirófano por parte de distintas especialidades o cirujanos a lo largo del día (Fei, et al., 2010). La flexibilidad es, por tanto, el elemento distintivo de esta metodología.

Este enfoque suele emplearse en un número limitado de quirófanos dentro del hospital, generalmente para absorber intervenciones urgentes o imprevistas sin interferir en la planificación habitual. También puede utilizarse en contextos donde la demanda es baja o muy variable, o en hospitales pequeños con escasa actividad quirúrgica (Gómez-Ríos, et al., 2019).

Entre sus principales ventajas destaca su capacidad para adaptarse a urgencias y su aparente simplicidad de implementación. No obstante, también presenta limitaciones significativas: suele conllevar una menor eficiencia en la utilización de quirófanos y una planificación ineficaz de los recursos materiales y humanos. Además, dificulta la continuidad de los equipos quirúrgicos, genera tiempos muertos por desplazamientos y reorganizaciones, y favorece que los servicios que pueden programar con mayor antelación acaparen los horarios más ventajosos, en detrimento de pacientes urgentes (Fei, et al., 2010).

La **programación por horarios reservados o por bloques (*Block Scheduling*)** consiste en asignar a un servicio quirúrgico o a un cirujano un quirófano específico durante un periodo de tiempo determinado, es decir, un bloque de tiempo. Durante ese bloque, el responsable puede planificar y realizar todas las intervenciones que considere necesarias, dentro de los límites establecidos (Kharraja, et al., 2006). Esta estrategia proporciona una estructura organizada y predecible al funcionamiento del bloque quirúrgico, facilitando tanto la planificación del hospital como la de los propios profesionales.

Este sistema es ampliamente utilizado en hospitales con alta carga quirúrgica y necesidad de maximizar la eficiencia de uso del quirófano. También se emplea en aquellos contextos donde es fundamental garantizar cierta continuidad en la atención, o donde se busca especializar quirófanos en función de determinadas disciplinas quirúrgicas (Blake, et al., 2002).

Entre sus principales beneficios se encuentra una mayor tasa de utilización de los quirófanos, una reducción en los tiempos de cambio entre intervenciones y un menor número de cancelaciones. Además, permite que los equipos quirúrgicos mantengan la continuidad durante toda la jornada, evitando desplazamientos innecesarios, y facilita la planificación anticipada tanto de la actividad quirúrgica como de las tareas asistenciales complementarias. Sin embargo, esta estrategia también tiene inconvenientes: si los bloques asignados no se utilizan en su totalidad, pueden generarse periodos de inactividad que no pueden ser aprovechados rápidamente por otros servicios. Asimismo, el sistema puede volverse rígido si no se dispone de herramientas adecuadas para monitorizar y reajustar el uso efectivo de los bloques (Samudra, et al., 2016) (Lu, et al., 2019).

Existen diversas variaciones de la programación por bloques que intentan mitigar sus limitaciones e incrementar su flexibilidad (Lu, et al., 2019):

- ***Dynamic Block Scheduling***: ajusta periódicamente la asignación de bloques en función del grado de utilización real por parte de los servicios o cirujanos.

- **Modified Block Scheduling:** mantiene algunos bloques sin asignar de forma fija, reservándolos para absorber desviaciones o imprevistos en la programación.
- **Quarter Day Sessions:** divide las jornadas quirúrgicas en bloques más pequeños (por ejemplo, cuartos de día), lo que permite una asignación más granular y adaptable.
- **Multiple-Room System:** permite que un mismo cirujano esté asignado a varios quirófanos durante un turno, alternando entre ellos para eliminar tiempos de espera entre intervenciones.

Además de las dos estrategias clásicas de programación quirúrgica (abierta y por bloques), algunos hospitales optan por modelos híbridos que combinan elementos de ambas. Esta modalidad, conocida como **programación combinada (Combined Scheduling)** permite mantener la estructura y eficiencia propias de la programación por bloques, incorporando al mismo tiempo cierta flexibilidad para dar respuesta a necesidades urgentes o fluctuaciones en la demanda. Para ello, se reserva una parte del tiempo quirúrgico como programación abierta, ya sea de forma fija o liberando bloques no utilizados (Min & Yih, 2010). Esta combinación resulta especialmente útil en entornos con alta carga quirúrgica y múltiples equipos en funcionamiento, aunque también plantea desafíos organizativos relacionados con la gestión del tiempo liberado y la anticipación necesaria para su aprovechamiento óptimo.

2.3 Situación actual de la programación quirúrgica

En este apartado se analiza la situación actual de la programación quirúrgica desde tres perspectivas complementarias: en primer lugar, se estudia el rendimiento de los quirófanos a partir de indicadores específicos que permiten evaluar su utilización y eficiencia; en segundo lugar, se examina el impacto económico asociado a este área del hospital, con especial atención a los costes derivados de la infrautilización o la sobrecarga de recursos; por último, se revisan las herramientas actualmente empleadas para llevar a cabo este proceso.

2.3.1 Rendimiento de los quirófanos

Evaluar el rendimiento de los quirófanos constituye una tarea compleja, principalmente porque la recogida de datos se realiza de forma manual por el personal médico al finalizar cada intervención o al término de la jornada. Esta metodología puede dar lugar a inexactitudes o inconsistencias en los registros, lo que limita la fiabilidad de los análisis que se pueden extraer a partir de ellos (Fong, et al., 2016).

A pesar de estas limitaciones, existen múltiples métricas que permiten analizar de forma aproximada el uso y la eficiencia de los quirófanos. A continuación, se describen los indicadores más relevantes (Serra Sutton, et al., 2011):

- **Tiempo medio de utilización de quirófanos.** Mide en minutos el tiempo total que los pacientes permanecen dentro del quirófano, incluyendo anestesia, cirugía, reanimación y movilización.
- **Tiempo medio de rotación entre pacientes.** Refleja el tiempo necesario para preparar el quirófano entre dos intervenciones consecutivas, incluyendo limpieza y preparación del instrumental.
- **Tiempo medio agendado para quirófanos.** Indica las horas teóricas programadas en la agenda quirúrgica.
- **Número de intervenciones quirúrgicas realizadas.** Representa el total de cirugías programadas efectivamente ejecutadas por unidad de tiempo, normalmente al día. Es un indicador directo de productividad.
- **Índice de ocupación bruto.** Es el porcentaje de tiempo en que los quirófanos están ocupados (incluyendo rotaciones). Su valor será superior al del índice de ocupación neto.
- **Índice de ocupación neto.** Mide el porcentaje de tiempo en que los quirófanos están siendo utilizados exclusivamente para cirugía, excluyendo rotaciones.
- **Tiempo medio de sobreutilización del quirófano.** Indica los minutos que un quirófano permanece activo más allá de su horario planificado.
- **Porcentaje de cancelaciones de operaciones programadas.** Mide la proporción de cirugías que no se realizan respecto al total de operaciones programadas.

A continuación, se presentan, para los distintos indicadores de rendimiento, los valores de referencia y los datos reales observados en diversos estudios. En este sentido, estudios previos sugieren que el **índice de ocupación bruto** debe situarse entre el 75 % y el 90 %, con un valor recomendado del 82,5 % (Albareda, et al., 2017) (Gómez-Ríos, et al., 2019). En la práctica, los datos observados varían considerablemente. Con programación manual, se ha observado un rendimiento del 75,9% (Albareda, et al., 2017); mientras que estudios realizados en otro hospital muestran una utilización mensual promedio del 60 % (Uribe-Gómez & Barrientos-Gómez, 2022). Además, según las entrevistas realizadas con profesionales del HCUV, lo habitual en su centro es que la ocupación bruta real se sitúe entre el 60 % y el 70 %, lo que confirma la existencia de un margen significativo de mejora.

El **tiempo entre intervenciones** se recomienda que sea inferior a los 25 minutos (Gómez-Ríos, et al., 2019), y algunas fuentes fijan un estándar ideal en torno a los 15-17 minutos (Serra Sutton, et al., 2011). En este caso, los valores observados en un estudio retrospectivo realizado en el Hospital Clínico Universitario de Zaragoza muestran un valor de entre 19 y 20 minutos (Albareda, et al., 2017), lo que entra dentro de los límites establecidos.

El **porcentaje de cancelaciones de operaciones programadas**, según los estándares internacionales, debería ser inferior al 5 %, siendo lo ideal alcanzar un índice de cancelación nulo (Gómez-Ríos, et al., 2019). No obstante, los datos reales muestran un escenario problemático: en algunas instituciones se han detectado tasas de entre el 9 % y el 11 % (Uribe-Gómez & Barrientos-Gómez, 2022), si bien es cierto que en la literatura se observa una gran variabilidad para este indicador, oscilando entre el 2 % y el 27 %. Según datos proporcionados por el HCUV, en el año 2025 han fijado como objetivo una tasa de cancelaciones máxima del 3,5 %, observando en lo que va de año unos valores entre el 2,4 % y el 3,1 %.

En relación al **tiempo de sobreutilización del quirófano**, en la práctica, se ha observado que el 22,45 % de las sesiones quirúrgicas finalizan más allá del horario previsto (Albareda, et al., 2017), lo que está dentro del objetivo marcado de que menos de un tercio de los quirófanos terminen su actividad fuera del horario (Gómez-Ríos, et al., 2019).

En cuanto al **número de intervenciones quirúrgicas** realizadas, no existe consenso para un valor objetivo, aunque el Ministerio de Salud y Servicios Sociales de Francia estima que cada quirófano debería realizar unas 1.000 intervenciones anuales. En Chile, por ejemplo, se realizan en promedio 3,3 cirugías por quirófano y día, frente a las 5,1 diarias observadas en el Reino Unido (Comisión Nacional de Evaluación y Productividad, 2020). No obstante, este indicador depende en gran medida del contexto específico de cada hospital y del tipo de intervenciones que se llevan a cabo, ya que los procedimientos de mayor duración limitan el número total de intervenciones por jornada, mientras que en entornos con cirugías más cortas es posible alcanzar cifras más elevadas.

2.3.2 Impacto económico

El bloque quirúrgico representa uno de los pilares fundamentales del sistema hospitalario no solo desde el punto de vista asistencial, sino también desde el punto de vista económico. Su relevancia es tal que, en los hospitales españoles, el funcionamiento de los quirófanos puede llegar a absorber hasta un 40 % del presupuesto total del hospital, y concentrar hasta el 70 % de los pacientes que requieren atención (Albareda, et al., 2017). Incluso en estimaciones más conservadoras, se ha estimado que el bloque quirúrgico

consume entre un 16 % y un 20 % del gasto hospitalario (Ramírez, 2015). Estos datos evidencian que cualquier mejora en su eficiencia repercute directamente en la sostenibilidad del sistema sanitario.

Este elevado impacto económico se debe tanto a los costes estructurales asociados a su infraestructura (quirófanos, unidades de recuperación, sistemas de monitorización avanzada) como a los recursos humanos y materiales que intervienen en cada intervención: cirujanos, anestesistas, personal de enfermería, material quirúrgico desechable, dispositivos de soporte vital, entre otros. En este contexto, uno de los indicadores más empleados para cuantificar el coste asociado al uso del quirófano es el coste por minuto de ocupación, una cifra que varía significativamente en función de la fuente consultada y de los criterios utilizados para su estimación. Mientras algunas referencias sitúan este coste en torno a los 15 euros por minuto (900 €/hora) (Ramírez, 2015), otras lo elevan hasta los 50 euros por minuto (3.000 €/hora) (Rothstein & Raval, 2018).

Cabe destacar que este coste no se limita exclusivamente al tiempo en el que se está realizando una intervención quirúrgica, sino que también se incurre en gastos incluso cuando el quirófano está desocupado, ya que todo el equipo humano y tecnológico permanece disponible y operativo.

Por otra parte, la sobreutilización del quirófano, es decir, la prolongación de la actividad quirúrgica más allá del horario programado, también conlleva un importante sobre coste para el hospital. Esta práctica suele estar asociada a la acumulación de retrasos durante la jornada. Se estima que los costes derivados de la sobreutilización pueden ser entre 1,5 y 2 veces superiores al coste del tiempo regular de quirófano (Gómez-Ríos, et al., 2019), debido a que implican el pago de horas extra al personal y el funcionamiento extendido de los sistemas quirúrgicos.

A nivel agregado, los procesos quirúrgicos son considerablemente más costosos que otros tipos de atención hospitalaria. Según datos del Sistema Nacional de Salud, en 2022 el coste medio de un proceso quirúrgico ascendía a 7.402,05 €, frente a los 4.049,76 € de un proceso médico (Ministerio de Sanidad, 2022).

En este escenario, mejorar la eficiencia en el uso de los recursos quirúrgicos es necesario no solo para absorber de forma adecuada la creciente demanda de intervenciones quirúrgicas, sino también para garantizar la sostenibilidad financiera del sistema sanitario a largo plazo.

2.3.3 Herramientas actuales

La planificación y programación quirúrgica es un proceso complejo que implica coordinar múltiples recursos humanos, materiales y temporales. Para llevarlo a cabo de forma eficiente y garantizar los mejores resultados posibles, es necesario seguir una serie de reglas, criterios y secuencias de tareas que aseguren un uso óptimo del tiempo quirúrgico y de los recursos disponibles.

Sin embargo, en la mayoría de hospitales, este proceso se lleva a cabo de forma manual, sin el apoyo de herramientas especializadas. La programación se basa principalmente en la experiencia de los profesionales responsables, como el coordinador del bloque quirúrgico y los jefes de los distintos servicios quirúrgicos. La estimación de la duración de las intervenciones, por ejemplo, suele realizarse atendiendo a la práctica habitual del hospital, las características del servicio y la intuición de los responsables (Albareda, et al., 2017). Habitualmente, la programación quirúrgica se planifica con antelación mensual, pero se revisa y ajusta de forma continua, especialmente en los días previos a la cirugía. A pesar de ello, muchos de los factores que afectan a la eficiencia del uso del quirófano (como las cancelaciones o modificaciones de última hora) se producen en las 24 horas anteriores, cuando ya resulta muy difícil reorganizar la agenda. Este modelo de trabajo, aunque basado en la experiencia, presenta limitaciones importantes, ya que no permite abordar adecuadamente la incertidumbre inherente al entorno quirúrgico. Las soluciones tradicionales, como sobredimensionar el tiempo estimado de cada cirugía para prevenir imprevistos, tienden a generar ineficiencias significativas, como retrasos acumulados, cancelaciones o un uso ineficiente de los recursos disponibles (Gómez-Ríos, et al., 2019).

En el caso concreto del HCUV, se ha podido observar que estos procesos se realizan mediante el uso de hojas de cálculo diseñadas por el propio coordinador del bloque quirúrgico. Esta herramienta, de elaboración propia y basada en Microsoft Excel, contiene estructuras de datos y formatos que permiten registrar, de manera ordenada, la actividad prevista para los distintos servicios quirúrgicos. Una vez elaboradas, las hojas se distribuyen entre los responsables de cada servicio, quienes deben introducir manualmente las intervenciones que desean programar en el periodo correspondiente. Este sistema permite cierto grado de coordinación, pero requiere una gestión intensiva, es altamente dependiente del trabajo manual y carece de automatismos para validar o verificar la viabilidad de la programación propuesta.

La complejidad y relevancia del proceso de planificación y programación quirúrgica han llevado al desarrollo de soluciones comerciales específicas que buscan facilitar el trabajo de los profesionales y mejorar los resultados. Estas herramientas varían en alcance y funcionalidad, pero comparten el objetivo de apoyar la gestión del bloque

quirúrgico mediante interfaces visuales, alertas automatizadas y gestión de listas de espera. Entre las opciones más destacadas actualmente, se encuentran Torin (de Getinge) y CIRUS (de Bahía Software), que ofrecen funcionalidades diseñadas para modernizar este proceso.

Torin es un software de gestión de quirófanos desarrollado por Getinge que incorpora inteligencia artificial (IA) para optimizar tanto la planificación diaria como la de largo plazo. Según su web, permite la programación basada en IA, predicción automática de tiempos quirúrgicos, gestión de listas de espera, monitoreo en tiempo real del progreso de las intervenciones y generación de informes completos. Torin incluye tres módulos diferenciados: *Planning*, *Progress* y *Optimization*, adaptables a distintos niveles de madurez del hospital. En particular, la variante *Optimization* usa IA para predecir con precisión la duración de las cirugías y detectar posibles conflictos de recursos, lo que permite una programación avanzada y dinámica (Getinge, 2025).

CIRUS, por su parte, es una plataforma española ofrecida por Bahía Software como solución integral para el bloque quirúrgico. Se presenta como un sistema modular y escalable, diseñado para optimizar recursos, reducir listas de espera y mejorar la seguridad del paciente. Entre sus funcionalidades se incluye el control del flujo de pacientes, la minimización de cancelaciones, la gestión de urgencias y la obtención de indicadores de rendimiento mediante informes y estadísticas. Aunque no especifica el uso de tecnologías de IA o algoritmos de optimización avanzada, su valor reside en integrar digitalmente todo el proceso, permitiendo un seguimiento continuo y una mejor coordinación entre servicios (Bahía, 2025).

Sin embargo, tanto Torin como CIRUS presentan ciertas limitaciones que justifican la búsqueda de enfoques alternativos. Por un lado, se trata de soluciones cerradas y comerciales, que, si bien ofrecen funcionalidades avanzadas de gestión, no permiten personalizar con detalle la lógica de programación ni adaptar los criterios de optimización a las necesidades específicas de cada hospital. Además, en el caso de CIRUS, la ausencia de algoritmos matemáticos de optimización avanzada o de técnicas para manejar la incertidumbre en la duración de las cirugías limita su capacidad de generar agendas realmente eficientes en escenarios complejos. Torin, aunque incorpora IA, orienta su valor más hacia la predicción de tiempos que hacia una optimización global del bloque. Frente a estas carencias, la herramienta desarrollada en este trabajo se centra en la modelización matemática explícita del problema, integrando restricciones clínicas y organizativas directamente extraídas de la práctica hospitalaria, y aportando variantes capaces de controlar tanto el número de quirófanos empleados como el riesgo de sobrepasar los horarios planificados.

A pesar de la existencia de soluciones comerciales, la literatura académica continúa explorando nuevas formas de mejorar la planificación quirúrgica mediante tecnologías avanzadas. Estas investigaciones buscan superar las limitaciones de los sistemas actuales, incorporando enfoques que permitan gestionar mejor la incertidumbre y optimizar el uso de recursos. Entre las principales tecnologías en estudio se encuentran (Erdogan, et al., 2011):

- **Modelos matemáticos y optimización.** La aplicación de técnicas de optimización en el ámbito quirúrgico permite modelar de forma precisa el complejo problema de la programación. Estos modelos emplean restricciones lógicas y objetivos múltiples para asignar eficientemente las cirugías a los recursos disponibles, reduciendo tiempos muertos y mejorando el rendimiento general. Se utilizan métodos como la programación lineal entera, la programación mixta, el problema de la mochila múltiple (MKP, *Multidimensional Knapsack Problem*) o algoritmos metaheurísticos como ACO (*Ant Colony Optimization*) e ILS (*Iterated Local Search*) (Blum & Roli, 2003). Algunos estudios reportan mejoras de entorno al 20 % en el rendimiento quirúrgico respecto a la programación manual, gracias a la reducción de la variabilidad y la eliminación de subjetividades en la toma de decisiones (Albareda, et al., 2017).
- **IA y aprendizaje automático (ML).** La IA y el ML han demostrado un gran potencial en tareas de predicción, planificación y automatización dentro del entorno quirúrgico. Estas tecnologías se aplican, por ejemplo, para estimar la duración de las intervenciones, prever cancelaciones o asignar recursos en función de patrones históricos (Fairley, et al., 2019). Se han empleado algoritmos como XGBoost, Random Forest, redes neuronales o regresión logística, obteniendo una mayor precisión en la predicción de tiempos quirúrgicos (Tuwatananurak, et al., 2019). Modelos específicos adaptados a cada cirujano o tipo de intervención, así como técnicas avanzadas como las redes neuronales modulares (MANN) o los autocodificadores variacionales (VAE), ofrecen resultados prometedores en términos de eficiencia, reducción de costes y mejora en la toma de decisiones clínicas (Bellini, et al., 2025).
- **Sistemas integrales y de gestión de la información.** Una programación eficiente requiere disponer de información precisa, estructurada y actualizada en tiempo real. Por ello, cada vez es más común la incorporación de herramientas informáticas que permiten gestionar integralmente el bloque quirúrgico. Estos sistemas incluyen desde la solicitud y programación automatizada de intervenciones hasta el seguimiento del paciente a lo largo del proceso quirúrgico (Gómez-Ríos, et al., 2019).

Capítulo 3: Problemas de optimización

3.1	Introducción a los problemas de optimización	37
3.1.1	Métodos de resolución de un problema de optimización	38
3.2	Modelado del problema	40
3.3	Consideraciones para la programación quirúrgica	41
3.3.1	Optimización estocástica	41
3.3.2	Programación dinámica	41

3.1 Introducción a los problemas de optimización

Resolver un problema de optimización, en esencia, consiste en encontrar la mejor solución posible a una determinada situación, actividad o sistema, siguiendo un conjunto definido de criterios (Sahab, et al., 2013). Esta "mejor solución" se traduce formalmente en el valor óptimo (máximo o mínimo) de una función objetivo, la cual depende de un conjunto de variables de decisión sujetas a ciertas restricciones (Onwubolu & Babu, 2013). Dicho de otro modo, optimizar significa tomar decisiones para alcanzar el mejor valor posible de un parámetro, dentro de un espacio de soluciones posibles.

Este tipo de problemas es fundamental en múltiples disciplinas, incluyendo las matemáticas, la economía, la ingeniería, la informática o el análisis de datos. Su resolución permite, por ejemplo, minimizar costes, maximizar beneficios o mejorar el uso de recursos (Sahab, et al., 2013).

En la optimización combinatoria, donde se trabaja con un conjunto finito de soluciones posibles, han existido numerosos problemas clásicos ampliamente estudiados debido a su dificultad y relevancia práctica. A continuación, se presentan algunos de los más relevantes:

- **Problema del viajante (*Traveling Salesman Problem, TSP*)**. Consiste en encontrar la ruta más corta para un viajante que debe visitar un conjunto de ciudades exactamente una vez y regresar al punto de partida (Gavish & Graves, 1978).
- **Problema de la mochila (*Knapsack Problem, KP*)**. Se trata de seleccionar qué objetos meter en una mochila de capacidad limitada, de forma que se maximice el valor total. Cada objeto tiene un peso y un valor, y no se pueden superar los límites de carga (Salkin & De Kluyver, 1975).
- **Problema de la planificación de proyectos (*Project Scheduling / Job Shop Scheduling Problem*)**. Implica asignar trabajos a recursos (normalmente maquinaria) en un calendario, cumpliendo restricciones de orden y disponibilidad, con el objetivo de minimizar el tiempo total (Manne, 1960).

Al abordar un problema de optimización, es fundamental identificar los componentes que lo definen. Esta tarea es especialmente importante a la hora de modelar el problema, ya que permite traducir una situación real a un lenguaje matemático que pueda ser resuelto de forma eficiente (Kall, 1986). Los elementos básicos de los que consta un problema de optimización son los siguientes (Ramos, et al., 2010):

- **Función objetivo**. Es la expresión matemática que se desea optimizar. Puede representar, por ejemplo, el beneficio que se pretende maximizar o el coste,

tiempo o distancia que se desea minimizar. Define el objetivo principal del problema.

- **Variables de decisión.** Representan las decisiones que deben tomarse. Cada combinación de valores de estas variables da lugar a una posible solución del problema. Su elección afecta directamente al valor de la función objetivo.
- **Restricciones.** Son las condiciones que deben cumplir las variables de decisión para que una solución sea válida. Estas limitaciones pueden reflejar restricciones físicas, recursos disponibles, requisitos técnicos u otras condiciones del sistema que se está modelando.

3.1.1 Métodos de resolución de un problema de optimización

Existen múltiples métodos y algoritmos que permiten abordar estos problemas en función de su naturaleza, complejidad y requisitos específicos. Estos métodos se pueden clasificar en cuatro grandes categorías: métodos exactos, métodos heurísticos, metaheurísticos y métodos híbridos (Jourdan, et al., 2009). Cada uno de ellos presenta ventajas y limitaciones particulares, lo que condiciona su aplicabilidad en diferentes contextos.

Los **métodos exactos** son algoritmos diseñados para encontrar la solución óptima de un problema en un tiempo razonable, garantizando que dicha solución es la mejor posible bajo las restricciones impuestas. Son especialmente eficaces en problemas bien definidos y de tamaño moderado (Jourdan, et al., 2009). Entre los métodos más conocidos se encuentran el método *simplex* para programación lineal, los algoritmos de búsqueda exhaustiva, *backtracking*, *branch and bound*, así como algoritmos clásicos para grafos como *Dijkstra*, *Bellman-Ford* o *Floyd-Warshall* (Vitoriano & Ramos, 2023). Aunque garantizan resultados óptimos, su aplicabilidad se ve limitada cuando el problema es de gran escala o pertenece a la clase NP-duro³, debido a su elevado coste computacional.

Los **métodos heurísticos** buscan encontrar soluciones satisfactorias en tiempos razonables, aunque no garantizan el óptimo global. Su principal fortaleza es la rapidez y simplicidad, lo que los hace muy útiles en contextos donde se requiere una solución suficientemente buena de forma ágil (Andradóttir, 1998). Se aplican comúnmente en problemas complejos o NP-duros donde los métodos exactos son impracticables (Martí & Reinelt, 2022). Algunos ejemplos incluyen estrategias voraces (*greedy*), de búsqueda

³ Un problema se considera NP-duro (*NP-hard*) cuando su resolución implica una complejidad computacional muy elevada, de modo que el tiempo necesario para encontrar la solución crece de forma exponencial con el tamaño del problema. Esto hace que, en la práctica, resulte inviable resolver estos problemas mediante métodos exactos, ya que el tiempo de cálculo sería excesivo. Este tipo de problemas aparece con frecuencia en entornos reales donde existen muchas combinaciones posibles y restricciones complejas, como la planificación, la logística o la asignación de recursos. Por ello, en estos casos se recurre habitualmente a métodos aproximados como heurísticos o metaheurísticos (Hochba, 1997).

local, *hill climbing* o el algoritmo del vecino más cercano. No obstante, su incapacidad para escapar de los óptimos locales, quedándose atrapados en soluciones que no son el óptimo global, limita su efectividad en ciertos entornos.

Los **métodos metaheurísticos** son esquemas de resolución que guían la búsqueda de soluciones a través de principios generales, muchas veces inspirados en fenómenos naturales o sociales. A diferencia de los métodos heurísticos simples, están diseñados para evitar quedar atrapados en óptimos locales y mejorar la exploración global del espacio de soluciones, lo que les hace muy versátiles y aplicables a una amplia gama de problemas complejos (Blum & Roli, 2003). Algunos ejemplos ampliamente utilizados son los algoritmos genéticos (*Genetic algorithm*, GA), recocido simulado (*Simulated annealing*, SA) o búsqueda tabú (Fouskakis & Draper, 2002). También se suele utilizar la optimización por colonia de hormigas (*Ant Colony Optimization*, ACO) u optimización por enjambre de partículas (*Particle Swarm Optimization*, PSO) (Blum & Roli, 2003). Aunque tampoco garantizan la solución óptima, ofrecen resultados de alta calidad y son fácilmente implementables.

Los **métodos híbridos** combinan las fortalezas de distintas técnicas para mejorar la eficiencia y calidad de las soluciones. Esta integración puede darse entre distintos algoritmos para lograr una mejor exploración del espacio de soluciones (Figueira & Almada-Lobo, 2014). Se aplican especialmente en problemas muy complejos o multiobjetivo, donde una única estrategia resulta insuficiente (Renders & Flasse, 1996). Ejemplos de hibridación incluyen combinaciones como algoritmos genéticos con recocido simulado (GA-SA) o ramificación y poda (Roberts & Thomas, 1991).

En la actualidad, existen diversas herramientas y entornos de desarrollo que permiten resolver problemas de optimización de manera eficiente sin que el usuario necesite entrar en el detalle de los algoritmos subyacentes (Meindl & Templ, 2012). Entre las más destacadas se encuentran Gurobi e IBM CPLEX, ambos ampliamente utilizados en entornos académicos e industriales (Anand, et al., 2017).

Por un lado, **Gurobi** es una herramienta comercial que permite resolver problemas de programación lineal, entera, cuadrática y cuadrática entera mixta, entre otros; es reconocido por su rapidez, fiabilidad y capacidad de integración con lenguajes de programación como Python, Java o C++, lo que lo convierte en una herramienta ampliamente utilizada para problemas de planificación, logística, producción y finanzas (Gurobi, 2025).

Por otro lado, **IBM CPLEX** es otra herramienta comercial utilizada para resolver problemas similares; ofrece una interfaz de usuario amigable y potentes capacidades de análisis para facilitar el modelado, la depuración y la solución de problemas complejos.

Al igual que Gurobi, CPLEX también se integra fácilmente con diversos lenguajes de programación y plataformas analíticas (IBM, 2025).

Estas herramientas permiten a los usuarios centrarse en el diseño del modelo matemático del problema, mientras delegan la tarea de búsqueda de la solución óptima en algoritmos ya optimizados y probados.

3.2 Modelado del problema

Resolver un problema de optimización no solo implica aplicar algoritmos o técnicas matemáticas, sino también seguir un proceso sistemático que permita traducir una situación real en un modelo formal (Kochenberger, et al., 2004). Esta configuración requiere varias etapas que van desde la comprensión del problema hasta su implantación definitiva (Vilcarromero Ruiz, 2017). A continuación, se describen las principales fases que conforman este proceso (Calafiore & El Ghaoui, 2014).

1. **Identificación del problema.** En la vida real, los problemas suelen estar formulados de manera ambigua o imprecisa. El primer paso consiste en recopilar toda la información relevante, identificar claramente los objetivos que se quieren alcanzar y comprender las restricciones que condicionan el sistema. Esta etapa es crucial para asegurar que el modelo que se construya posteriormente refleje fielmente la situación a resolver.
2. **Especificación matemática y formulación.** Una vez delimitado el problema, se lleva a cabo su formalización matemática. En esta fase se definen las variables de decisión, la función objetivo a optimizar y las restricciones que limitan el espacio de soluciones. La calidad de esta formulación influye directamente en la eficacia del modelo, especialmente en problemas no lineales o enteros, donde una buena elección del enfoque puede marcar la diferencia en términos de rendimiento computacional.
3. **Verificación, validación y refinamiento.** Con el modelo formulado, se procede a su resolución y análisis inicial. Esta etapa permite detectar posibles errores en la formulación o inconsistencias con respecto al comportamiento esperado. Se valida el modelo comparando sus resultados con situaciones conocidas o plausibles, y se realizan los ajustes necesarios para mejorar su precisión y coherencia.
4. **Interpretación y análisis de los resultados.** Obtenidos los resultados, es fundamental analizarlos cuidadosamente. Se estudia cómo varían las soluciones ante cambios en los parámetros del modelo (análisis de sensibilidad) y se evalúa si estas soluciones son viables y útiles en la práctica. En algunos casos, esta

interpretación puede incluso sugerir mejoras o nuevas alternativas en la formulación inicial.

5. **Implantación, documentación y mantenimiento.** Finalmente, el modelo debe integrarse en su contexto operativo real. Para facilitar su uso y garantizar su sostenibilidad a largo plazo, es imprescindible documentar detalladamente todo el proceso, incluyendo tanto los aspectos teóricos como los técnicos. Esta documentación debe servir de guía para futuras actualizaciones, adaptaciones o para otros usuarios que trabajen con el modelo en el futuro.

3.3 Consideraciones para la programación quirúrgica

3.3.1 *Optimización estocástica*

En el ámbito de la programación quirúrgica, uno de los principales desafíos es la incertidumbre asociada a la duración real de las intervenciones, la cual es difícil prever con exactitud (Denton, et al., 2007). Esta variabilidad puede afectar significativamente la planificación y el uso eficiente de los recursos quirúrgicos.

Para hacer frente a esta situación, se recurre a técnicas de optimización estocástica, un enfoque que permite modelar y resolver problemas de decisión bajo incertidumbre (Powell, 2019). En estos modelos, tanto la función objetivo como las restricciones pueden depender de parámetros inciertos o aleatorios (Marti, 2015) (Vitoriano & Ramos, 2023). El objetivo es encontrar soluciones que no solo sean óptimas en promedio, sino también robustas, es decir, capaces de adaptarse o rendir bien ante distintos escenarios posibles (Amaran, et al., 2016). En el contexto quirúrgico, esto permite generar una planificación quirúrgica óptima que sea robusta frente a esta incertidumbre, que garantice un uso eficiente de los quirófanos y, al mismo tiempo, que controle el riesgo de extenderse más allá del horario previsto.

3.3.2 *Programación dinámica*

En la programación quirúrgica, además de la incertidumbre en la duración de las intervenciones, existen numerosos imprevistos que pueden alterar la planificación inicial. Estos imprevistos pueden deberse tanto a factores clínicos, como la cancelación de una operación por mejora del estado del paciente o por razones médicas que impiden su realización, como a factores operativos, como la acumulación de retrasos que impide continuar con las intervenciones previstas (Zhang, et al., 2013).

Para gestionar este tipo de situaciones en entornos cambiantes, se emplean técnicas de programación dinámica (*dynamic scheduling*). Este enfoque permite abordar problemas de asignación de recursos en contextos donde los eventos se producen en

tiempo real y requieren ajustes inmediatos (Suresh & Chaudhuri, 1993). En el contexto de la programación quirúrgica, son útiles modelos predictivo-reactivos, capaces de adaptar la agenda quirúrgica en función de los cambios que se vayan produciendo, como cancelaciones, retrasos o reordenamientos por prioridad. Estas modificaciones se realizan de forma parcial y localizada, tratando de alterar lo menos posible la planificación inicial, minimizando así el impacto en el conjunto de intervenciones ya programadas (Ouelhadj & Petrovic, 2009) (Vitoriano & Ramos, 2023).

Capítulo 4: Formulación matemática del problema

4.1	Introducción.....	44
4.2	Modelo base.....	44
4.2.1	Descripción del problema.....	44
4.2.2	Formulación matemática del modelo base	45
4.3	Modelo alternativo 1.....	48
4.3.1	Descripción del modelo alternativo 1	48
4.3.2	Formulación matemática del modelo alternativo 1	48
4.4	Modelo alternativo 2.....	49
4.4.1	Descripción del modelo alternativo 2	49
4.4.2	Formulación matemática del modelo alternativo 2	50
4.5	Modelo alternativo 3.....	50
4.5.1	Descripción del modelo alternativo 3	50
4.5.2	Formulación matemática del modelo alternativo 3	51
4.6	Modelo alternativo 4.....	51
4.6.1	Descripción del modelo alternativo 4.....	51
4.6.2	Formulación matemática del modelo alternativo 4	52
4.7	Modelo alternativo 5.....	54
4.7.1	Descripción del modelo alternativo 5	54
4.7.2	Formulación matemática del modelo alternativo 5	55

4.1 Introducción

En este capítulo se recogen los distintos modelos matemáticos desarrollados con el objetivo de replicar de forma precisa el proceso de programación quirúrgica observado en un entorno hospitalario real. Para ello, se ha tomado como referencia el flujo de trabajo seguido por el HCUV, que emplea una metodología de programación por bloques o horarios reservados (*Block Scheduling*). En este enfoque, los quirófanos se asignan previamente a cada servicio quirúrgico en bloques de tiempo fijos, sobre los cuales posteriormente se programan las intervenciones específicas. Los modelos desarrollados en este trabajo parten de dicha asignación previa y se centran en optimizar el uso de los bloques reservados.

El punto de partida ha sido el diseño de un modelo base, que incorpora una serie de restricciones fundamentales necesarias para garantizar una asignación funcional y coherente de intervenciones quirúrgicas a quirófanos y días.

A partir de este modelo inicial, se han desarrollado distintos modelos alternativos que incorporan nuevas restricciones o modificaciones sobre la formulación original. Estas variantes permiten adaptar el modelo a situaciones específicas del entorno hospitalario o tener en cuenta nuevas consideraciones operativas.

Cada uno de los modelos propuestos se presenta de forma detallada a lo largo de este capítulo, especificando sus variables de decisión, parámetros, función objetivo y conjunto de restricciones.

4.2 Modelo base

4.2.1 Descripción del problema

El área quirúrgica de cualquier hospital cuenta con una serie de recursos fundamentales que intervienen en el proceso de programación de intervenciones. Los recursos considerados en este caso son los pacientes pendientes de intervención, los cirujanos disponibles, los quirófanos del hospital y el conjunto de días que conforman el horizonte temporal de estudio.

Los pacientes que se encuentran en lista de espera se representan mediante el conjunto P , utilizando el índice p para referirse a cada uno de ellos de forma individual. Estos pacientes deben ser asignados a un quirófano del hospital (conjunto Q , índice q), en un día determinado (conjunto D , índice d) y atendidos por su correspondiente cirujano (conjunto C , índice c).

La asignación de pacientes a cada quirófano debe respetar su capacidad temporal en cada jornada (r_{qd}), así como la disponibilidad horaria del cirujano asignado (α_{cd}). Además, se tiene en cuenta para cada paciente una fecha máxima que marca el límite clínicamente aceptable para su cirugía (L_p). Para cada intervención se conoce también su duración estimada (t_p) y su desviación estándar (σ_p).

Se considera que cada paciente tiene asignado de forma previa un cirujano concreto, lo cual se recoge en el parámetro μ_p , que asocia al paciente p con el índice del cirujano correspondiente. Además, se considera un tiempo de rotación entre intervenciones fijo que se recoge en el parámetro Δ .

El modelo define dos variables binarias de decisión. La primera, X_{pqd} , toma valor 1 si el paciente p es programado en el quirófano q el día d , y 0 en caso contrario. La segunda, Z_{cqd} , toma valor 1 si el cirujano c opera en el quirófano q el día d , y 0 en caso contrario.

El objetivo del modelo consiste en maximizar el número de intervenciones realizadas en el horizonte temporal utilizado, respetando las restricciones operativas fijadas.

4.2.2 Formulación matemática del modelo base

El modelado matemático del problema se ha basado en la formulación presentada por Molina-Pariente et al. (2015) en su artículo *New heuristics for planning operations rooms*, adaptando sus estructuras a las particularidades observadas en el HCUV y a las necesidades de la herramienta de organización quirúrgica planteada.

A continuación, se muestra en la Tabla 1 un resumen de los índices y conjuntos del modelo, en la Tabla 2 las variables auxiliares y en la Tabla 3 las variables de decisión.

$p \in P$	Conjunto de pacientes (intervenciones) en lista de espera.
$q \in Q$	Conjunto de quirófanos.
$c \in C$	Conjunto de cirujanos.
$d \in D$	Conjunto de días del horizonte temporal.

Tabla 1: Índices y conjuntos del modelo.

r_{qd}	Capacidad temporal del quirófano q el día d (minutos).
α_{cd}	Capacidad temporal del cirujano c el día d (minutos).
μ_p	Cirujano a cargo del paciente p .
L_p	Fecha límite para la intervención del paciente p .
t_p	Duración estimada de la intervención del paciente p (minutos).
σ_p	Desviación típica de la duración de la intervención del paciente p (minutos).
Δ	Tiempo de rotación entre intervenciones (minutos).

Tabla 2: Variables auxiliares del modelo.

X_{pqd}	1 si el paciente p es programado en el quirófano q el día d , y 0 en caso contrario.
Z_{cqd}	1 si el cirujano c opera en el quirófano q el día d , y 0 en caso contrario.

Tabla 3: Variables de decisión del modelo.

Conocidos todos los parámetros a tener en cuenta en nuestro problema, se ha modelado matemáticamente de forma que se han obtenido 2 funciones objetivo y 9 restricciones que definen el comportamiento del modelo base de programación quirúrgica.

La función objetivo principal, recogida en la ecuación (1), busca maximizar el número total de intervenciones realizadas en el horizonte temporal considerado.

$$\text{Maximizar } \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \sum_{d \in D} X_{pqd} \quad (1)$$

Adicionalmente, se ha incluido una segunda función objetivo, representada en la ecuación (2), cuyo propósito es minimizar la variabilidad en la duración de las intervenciones seleccionadas. Concretamente, esta función secundaria trata de reducir la suma de las desviaciones típicas asociadas a las cirugías programadas, lo que favorece planes quirúrgicos más estables y predecibles. Gracias a las funcionalidades del *solver* Gurobi, es posible establecer esta segunda función como un objetivo subordinado que se optimiza siempre que no se sacrifique más de un determinado porcentaje del valor alcanzado en la función principal.

$$\text{Minimizar } \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \sum_{d \in D} \sigma_p * X_{pqd} \quad (2)$$

En cuanto a las restricciones, estas garantizan que la solución ofrecida por el modelo sea factible y respete todos los límites del área quirúrgica:

- La ecuación (3) asegura que cada paciente sea asignado, como máximo, a un único quirófano y un único día dentro del horizonte temporal.

$$\sum_{q \in Q} \sum_{d \in D} X_{pqd} \leq 1 \quad \forall p \in P \quad (3)$$

- La ecuación (4) impone que el tiempo total ocupado por las intervenciones asignadas a un quirófano determinado en un día no supere su capacidad operativa (r_{qd}), incluyendo en el cálculo los tiempos de rotación necesarios entre cirugías.

$$\sum_{p \in P} (t_p + \Delta) * X_{pqd} \leq r_{qd} \quad \forall q \in Q \quad \forall d \in D \quad (4)$$

- La ecuación (5) garantiza que la carga quirúrgica total asignada a cada cirujano en un día no exceda su disponibilidad horaria (α_{cd}).

$$\sum_{q \in Q} \sum_{\substack{p \in P \\ \mu p = c}} t_p * X_{pqd} \leq \alpha_{cd} \quad \forall c \in C \quad \forall d \in D \quad (5)$$

- La ecuación (6) establece que un cirujano puede operar como máximo en un quirófano por día.

$$\sum_{q \in Q} Z_{cqd} \leq 1 \quad \forall c \in C \quad \forall d \in D \quad (6)$$

- La ecuación (7) establece una vinculación directa entre la asignación de pacientes a quirófanos y la disponibilidad del cirujano responsable. De esta forma se prohíbe que un cirujano opere en un quirófano al que no esté asignado, y limita el total de tiempo que puede usar según el tiempo disponible del quirófano.

$$\sum_{\substack{p \in P \\ \mu p = c}} t_p * X_{pqd} \leq r_{qd} * Z_{cqd} \quad \forall c \in C \quad \forall d \in D \quad \forall q \in Q \quad (7)$$

- La ecuación (8), por su parte, actúa como restricción de vinculación recíproca, exigiendo que todo cirujano asignado a un quirófano realice al menos una intervención en él. De esta forma se evita que un cirujano esté asignado a un quirófano en el que no va a operar ese día.

$$\sum_{\substack{p \in P \\ \mu p = c}} t_p * X_{pqd} \geq Z_{cqd} \quad \forall c \in C \quad \forall d \in D \quad \forall q \in Q \quad (8)$$

- La ecuación (9) introduce una restricción temporal específica, que impide programar una intervención fuera del intervalo válido para el paciente, obligando a que esta se realice, como muy tarde, en el último día admitido para su cirugía (L_p).

$$\sum_{q \in Q} \sum_{d=L_p+1}^D X_{pqd} = 0 \quad \forall p \in P \quad (9)$$

- Finalmente, las ecuaciones (10) y (11) definen las variables de decisión del modelo como binarias, lo que implica que las decisiones de asignación se toman de forma discreta (sí o no) para cada combinación posible de paciente, quirófano y día, y de cirujano, quirófano y día.

$$X_{pqd} \in \{0, 1\} \quad \forall p \in P \quad \forall q \in Q \quad \forall d \in D \quad (10)$$

$$Z_{cqd} \in \{0, 1\} \quad \forall c \in C \quad \forall q \in Q \quad \forall d \in D \quad (11)$$

4.3 Modelo alternativo 1

4.3.1 Descripción del modelo alternativo 1

Este primer modelo alternativo se ha diseñado con el objetivo de acercar aún más la programación quirúrgica a la operativa real del hospital, incorporando una dimensión adicional de eficiencia relacionada con la gestión de los recursos infrautilizados. En concreto, este modelo introduce un nuevo enfoque orientado a minimizar el número de quirófanos en funcionamiento cada día, sin sacrificar por ello el número total de intervenciones realizadas. La idea es no solo maximizar el rendimiento dentro de cada quirófano, sino también evitar poner en marcha más quirófanos de los estrictamente necesarios, lo que conlleva un importante ahorro de costes en recursos humanos, energéticos y logísticos.

Este planteamiento resulta especialmente útil en escenarios con una demanda quirúrgica moderada o inferior a la capacidad total instalada, en los que es posible alcanzar los mismos niveles de ocupación del modelo base, pero concentrando la actividad en un menor número de quirófanos. Por el contrario, en contextos de alta demanda, en los que es necesario utilizar todos los quirófanos disponibles para dar respuesta a las necesidades asistenciales, el comportamiento del modelo será idéntico al del modelo base, ya que no existe margen para reducir el número de quirófanos operativos sin afectar al volumen de intervenciones.

4.3.2 Formulación matemática del modelo alternativo 1

Para implementar este nuevo enfoque centrado en la reducción del número de quirófanos utilizados, ha sido necesario introducir una nueva variable de decisión, que se recoge en la Tabla 4.

v_{qd}	1 si el quirófano q se utiliza el día d , y 0 en caso contrario.
----------	--

Tabla 4: Nueva variable de decisión del modelo alternativo 1.

A partir de esta variable, se ha redefinido la función objetivo secundaria del modelo, sustituyendo la ecuación (2) por la ecuación (12). En lugar de minimizar la desviación típica de las intervenciones programadas (como ocurría en el modelo base), se plantea ahora minimizar el número total de quirófanos utilizados a lo largo del horizonte temporal.

$$\text{Minimizar } \sum_{q \in Q} \sum_{d \in D} v_{qd} \quad (12)$$

Aunque esta función se formula como un objetivo secundario, en un escenario en el que la demanda de intervenciones es inferior a la capacidad disponible existen múltiples combinaciones que permiten maximizar el número total de intervenciones quirúrgicas

(objetivo principal) y, al mismo tiempo, minimizar el número de quirófanos en uso. Por tanto, el *solver* siempre podrá encontrar una solución óptima que satisfaga ambos criterios.

Además, se ha incorporado una nueva restricción que vincula la utilización de los quirófanos con la programación efectiva de intervenciones. Esta restricción establece que únicamente se podrán programar intervenciones en un quirófano en un día determinado si dicho quirófano ha sido declarado como activo en esa jornada. Para ello, se utiliza un parámetro auxiliar M , que representa un valor suficientemente grande (por ejemplo, el número de pacientes en lista de espera). La formulación queda recogida en la ecuación (13).

$$\sum_{p \in P} X_{pqd} \leq M * v_{qd} \quad \forall q \in Q \quad \forall d \in D \quad (13)$$

Esta restricción actúa como un mecanismo de activación lógica, forzando al modelo a marcar el quirófano como utilizado ($v_{qd} = 1$) únicamente cuando se asigna al menos un paciente en ese quirófano en ese día. En caso contrario, el valor de v_{qd} puede permanecer en 0, evitando así el uso innecesario del quirófano.

4.4 Modelo alternativo 2

4.4.1 Descripción del modelo alternativo 2

Este segundo modelo alternativo incorpora una restricción adicional que mejora el realismo de la programación quirúrgica al tener en cuenta las limitaciones físicas y técnicas de los quirófanos disponibles. En concreto, se introduce la idea de que no todas las intervenciones pueden realizarse en cualquier quirófano, ya que algunos de ellos están especializados o cuentan con equipamiento específico destinado a ciertos tipos de cirugías. Esta consideración responde directamente a la realidad operativa observada durante las entrevistas con el coordinador de quirófanos del HCUV, quien destacó que determinados quirófanos permanecen siempre configurados con equipamiento especializado que no se traslada habitualmente entre salas.

Esta limitación técnica obliga al modelo a restringir las asignaciones de intervenciones quirúrgicas únicamente a aquellos quirófanos en los que es viable llevarlas a cabo. Con ello se consigue una solución más ajustada al funcionamiento real del bloque quirúrgico, evitando planificaciones inviables o que requieran un esfuerzo logístico adicional para adaptar quirófanos no preparados.

4.4.2 Formulación matemática del modelo alternativo 2

Para implementar este nuevo enfoque que considera la compatibilidad entre intervenciones y quirófanos, ha sido necesario definir un nuevo conjunto que se muestra en la Tabla 5.

$i \in I$	Conjunto de tipos de intervención.
-----------	------------------------------------

Tabla 5: Nuevos índices y conjuntos del modelo alternativo 2.

Posteriormente, se han introducido dos nuevas variables auxiliares, que se recogen en la Tabla 6.

π_p	Valor del índice i correspondiente al tipo de intervención asignada al paciente p .
K_{iq}	1 si el tipo de intervención i se puede realizar en el quirófano q , y 0 en caso contrario.

Tabla 6: Nuevas variables auxiliares del modelo alternativo 2.

Finalmente, se ha incorporado una nueva restricción que limita las intervenciones que se pueden realizar en cada quirófano y día. Esta restricción se añade a las ya existentes en el modelo base, y se muestra en la ecuación (14).

$$X_{pqd} \leq K_{\pi_p q} \quad \forall p \in P \quad \forall q \in Q \quad \forall d \in D \quad (14)$$

Esta restricción hace que, si el quirófano q no es compatible con el tipo de intervención definido en π_p , entonces $K_{iq} = 0$, por lo que X_{pqd} tiene que valer 0 para que se cumpla que $X_{pqd} \leq 0$. Del mismo modo, en caso de que el quirófano q sea compatible con el tipo de intervención definido en π_p , entonces $K_{iq} = 1$, por lo que se cumple que $X_{pqd} \leq 1$ cuando X_{pqd} vale 1 o 0.

4.5 Modelo alternativo 3

4.5.1 Descripción del modelo alternativo 3

Este tercer modelo alternativo introduce un nuevo enfoque, al considerar que los cirujanos no están disponibles todos los días de la semana, sino únicamente en un subconjunto de días concretos. El objetivo de este enfoque es concentrar la actividad quirúrgica de cada profesional en un menor número de jornadas, permitiendo agrupar sus intervenciones de manera más eficiente. Esta agrupación tiene importantes beneficios tanto desde el punto de vista organizativo como clínico, ya que facilita la gestión de agendas, reduce la fragmentación de turnos y permite a los cirujanos concentrar su actividad asistencial fuera de quirófano en esos días.

Este planteamiento responde a la práctica habitual observada en hospitales de gran tamaño, como el HCUV, donde los cirujanos suelen tener asignados uno o dos días de quirófano por semana, compaginando esta labor con otras tareas asistenciales. Incorporar esta realidad al modelo matemático aumenta su realismo y permite obtener soluciones más alineadas con las condiciones reales del entorno hospitalario.

4.5.2 Formulación matemática del modelo alternativo 3

Para implementar este nuevo enfoque que limita la disponibilidad diaria de los cirujanos, ha sido necesario definir una nueva variable auxiliar que se muestra en la Tabla 7.

H_{cd}	1 si el cirujano c se puede operar el día d , y 0 en caso contrario.
----------	--

Tabla 7: Nueva variable auxiliar del modelo alternativo 3.

Además, se ha incorporado una nueva restricción que limita las intervenciones que se pueden realizar en cada quirófano y día en función de la disponibilidad del cirujano. Esta restricción se añade a las ya existentes en el modelo base, y se muestra en la ecuación (15).

$$Z_{cqd} \leq H_{cd} \quad \forall c \in C \quad \forall q \in Q \quad \forall d \in D \quad (15)$$

Esta restricción hace que, si el cirujano c no puede operar el día d , entonces $H_{cd} = 0$, por lo que Z_{cqd} tiene que valer 0 para que se cumpla que $Z_{cqd} \leq 0$. Del mismo modo, en caso de que el cirujano c pueda operar el día d , entonces $H_{cd} = 1$, por lo que se cumple que $Z_{cqd} \leq 1$ cuando Z_{cqd} vale 1 o 0.

4.6 Modelo alternativo 4

4.6.1 Descripción del modelo alternativo 4

Este cuarto modelo alternativo introduce un enfoque orientado a controlar el riesgo de sobrepasar la jornada quirúrgica prevista para cada quirófano. En concreto, se incorpora una restricción que permite limitar la probabilidad de que una jornada quirúrgica (entendida como el conjunto de intervenciones programadas en un quirófano durante un día) finalice más allá del horario establecido. Este enfoque permite ajustar el modelo a la realidad de ciertos entornos hospitalarios donde existe una alta sensibilidad hacia el cumplimiento de los horarios laborales del personal y de los quirófanos.

Este planteamiento surge a raíz de las entrevistas realizadas al coordinador de quirófanos del HCUV, quien señaló que, en su caso, se prefiere programar menos intervenciones si con ello se garantiza que no se producirán retrasos al final del día. Esta actitud preventiva reduce la presión sobre los equipos asistenciales y evita prolongaciones

no planificadas. No obstante, también se ha observado que este problema no es común a todos los hospitales; por ejemplo, en el Hospital Campo Grande de Valladolid (Grupo Recoletas), la eventual sobreutilización del quirófano no es considerada un factor limitante en la programación. Por tanto, este modelo resulta especialmente útil en entornos donde se desea minimizar el riesgo de extensión de jornada, aunque puede no ser prioritario en aquellos en los que existe mayor flexibilidad en este aspecto.

4.6.2 Formulación matemática del modelo alternativo 4

El enfoque propuesto en este modelo requiere una formulación matemática más compleja, así como ciertas aproximaciones que permitan incorporar la incertidumbre en la duración de las intervenciones quirúrgicas. El objetivo es limitar la probabilidad de que la duración total de las cirugías asignadas a un quirófano concreto en un determinado día sobrepase la capacidad disponible de dicho quirófano.

Para ello, se incorpora una nueva restricción que actúa sobre la probabilidad de sobreutilización de los quirófanos. Concretamente, se limita la probabilidad de que la suma de las duraciones de todas las intervenciones programadas en el quirófano q el día d (considerando también el tiempo de rotación entre pacientes, denotado como Δ) supere su capacidad temporal r_{qd} . Esta condición se representa inicialmente en la ecuación (16) para un nivel de confianza del 95 %.

$$P\left(\sum_{p \in P} (t_p + \Delta) * X_{pqd} \leq r_{qd}\right) \leq 0.05 \quad \forall q \in Q \quad \forall d \in D \quad (16)$$

Para facilitar su implementación en un entorno computacional, esta expresión se puede reescribir, como se muestra en la ecuación (17).

$$P\left(\sum_{p \in P} t_p * X_{pqd} \leq r_{qd} - \Delta * \sum_{p \in P} X_{pqd}\right) \leq 0.05 \quad \forall q \in Q \quad \forall d \in D \quad (17)$$

Como se explicará en detalle más adelante, la duración de las intervenciones quirúrgicas sigue una distribución log-normal. Por tanto, la variable t_p se sustituye por una variable aleatoria $D_p \sim \text{LogN}(\mu_p, \sigma_p^2)$, dando lugar a la formulación que se muestra en la ecuación (18).

$$P\left(\sum_{p \in P} D_p * X_{pqd} \leq r_{qd} - \Delta * \sum_{p \in P} X_{pqd}\right) \leq 0.05 \quad \forall q \in Q \quad \forall d \in D \quad (18)$$

donde:

$$D_p \sim \text{LogN}(\mu_p, \sigma_p^2)$$

Los parámetros μ_p y σ_p^2 que definen esta distribución se relacionan con la esperanza matemática y la varianza de la duración de las intervenciones mediante las expresiones que se muestran en la ecuación (19) y (20) respectivamente.

$$E[D_p] = e^{\mu_p + \frac{\sigma_p^2}{2}} \quad (19)$$

$$\text{Var}[D_p] = (e^{\sigma_p^2} - 1) * e^{2\mu_p + \sigma_p^2} \quad (20)$$

Dado que trabajar directamente con sumas de distribuciones log-normales es inabordable analíticamente (debido a que la distribución resultante de sumar de distribuciones log-normal no tiene una expresión analítica conocida), se introduce una primera aproximación. En concreto, se asume que la suma de múltiples variables log-normales se puede aproximar mediante una distribución normal. Aunque esta aproximación no es exacta, el Teorema del Limite Central establece que la distribución de la media de una muestra grande de variables aleatorias independientes tiende a aproximarse a una distribución normal, independientemente de la forma de la distribución original de la población (Kwak & Kim, 2017). La variable resultante se define en la ecuación (21).

$$S = \sum_{\forall p \in P} D_p * X_{pqd} \approx N(\mu_S, \sigma_S^2) \quad (21)$$

donde:

$$\begin{aligned} \mu_S &= \sum_{\forall p \in P} E[D_p] = \sum_{\forall p \in P} e^{\mu_p + \frac{\sigma_p^2}{2}} \\ y \quad \sigma_S^2 &= \sum_{\forall p \in P} \text{Var}[D_p] = \sum_{\forall p \in P} (e^{\sigma_p^2} - 1) * e^{2\mu_p + \sigma_p^2} \end{aligned}$$

La restricción probabilística original se transforma ahora en una restricción determinista, basada en el uso del percentil correspondiente a un nivel de confianza dado. Por ejemplo, para un nivel de confianza del 95 %, se obtiene la siguiente expresión que se muestra en la ecuación (22). En esta expresión, $z_{0.95}$ corresponde al cuantil de la distribución normal estándar asociado al nivel de confianza del 95 %.

$$\mu_S + z_{0.95} * \sqrt{\sigma_S^2} \leq r_{qd} - \sum_{\forall p \in P} \Delta \quad \forall q \in Q \quad \forall d \in D \quad (22)$$

No obstante, esta formulación presenta una limitación técnica: la presencia de una raíz cuadrada impide su resolución directa mediante el *solver* Gurobi en su versión académica, que únicamente permite resolver modelos lineales.

Para superar esta limitación, se recurre a una segunda aproximación basada en la desigualdad de Jensen (Abramovich, et al., 2004), de forma que se considera el sumatorio de raíces cuadradas en lugar de la raíz cuadrada del sumatorio, como se muestra en la ecuación (23).

$$\sqrt{\sum_{\forall p \in P} Var[D_p]} \approx \sum_{\forall p \in P} \sqrt{Var[D_p]} \quad (23)$$

Esta desigualdad establece que, como la raíz cuadrada es una función cóncava, se cumple que:

$$\sqrt{\sum_{\forall p \in P} Var[D_p]} \leq \sum_{\forall p \in P} \sqrt{Var[D_p]} \quad (24)$$

Y, por tanto, al sustituir el término $\sqrt{\sigma_S^2}$ por su cota superior, se obtiene una restricción más conservadora pero linealmente tratable, como se observa en la ecuación (25).

$$\mu_S + z_{0.95} * \sqrt{\sum_{\forall p \in P} Var[D_p]} \leq \mu_S + z_{0.95} * \sum_{\forall p \in P} \sqrt{Var[D_p]} \quad (25)$$

Esta transformación garantiza que, aunque se renuncie a parte de la precisión probabilística, se respete el objetivo original de limitar el riesgo de sobreutilización con un margen de seguridad adicional. Además, el valor de $z_{0.95}$ puede ajustarse fácilmente para definir distintos niveles de tolerancia al riesgo, lo que permite adaptar el modelo a diferentes políticas de programación quirúrgica según las preferencias del centro hospitalario.

4.7 Modelo alternativo 5

4.7.1 Descripción del modelo alternativo 5

Este quinto modelo alternativo introduce una modificación en la formulación de la función objetivo que, aunque aparentemente sutil, tiene un impacto significativo sobre el comportamiento del algoritmo y los resultados obtenidos. A diferencia del modelo base, cuya función objetivo principal se centraba en maximizar el número total de intervenciones quirúrgicas realizadas, este modelo plantea como objetivo maximizar el

tiempo efectivo de utilización de los quirófanos, es decir, la suma del tiempo total dedicado a cirugía en cada quirófano y día.

Este cambio de enfoque permite priorizar intervenciones de mayor duración, lo que puede resultar útil en escenarios donde el rendimiento del bloque quirúrgico se evalúa no tanto en términos del número de pacientes atendidos, sino del aprovechamiento global de los recursos disponibles. Aunque el coordinador de quirófanos del HCUV indicó que la práctica habitual se orienta principalmente a maximizar el número de intervenciones, con el objetivo de reducir listas de espera, incorporar esta alternativa ofrece una visión complementaria que puede resultar útil a la hora de programar intervenciones.

4.7.2 *Formulación matemática del modelo alternativo 5*

Para implementar este nuevo enfoque que pretende maximizar el tiempo de uso del bloque quirúrgico, se ha definido una nueva función objetivo, mostrada en la ecuación (16), que sustituye a la definida en la ecuación (1).

$$\text{Maximizar } \sum_{p \in P} \sum_{q \in Q} \sum_{d \in D} t_p * X_{pqd} \quad (16)$$

Esta nueva formulación orienta la optimización hacia una utilización más intensiva del tiempo disponible en quirófano, dando prioridad a aquellas combinaciones que permiten ocupar más minutos del bloque quirúrgico, independientemente del número de pacientes intervenidos. El resto de la estructura del modelo (conjuntos, parámetros, variables y restricciones) permanece inalterada respecto al modelo base, lo que permite comparar ambos enfoques manteniendo constante el resto de condiciones y evaluar sus implicaciones en distintos escenarios de planificación.

Capítulo 5: Descripción de la herramienta

5.1	Descripción general	57
5.1.1	Características y funcionalidades	57
5.2	Objetivos de la herramienta	58
5.3	Esquema funcional	59
5.3.1	Descripción del proceso de planificación	59
5.3.2	Diagrama de bloques de la herramienta	60
5.4	Requisitos	62
5.4.1	Requisitos funcionales	62
5.4.2	Requisitos no funcionales	63
5.5	Resolución del problema de optimización	64
5.5.1	Entorno de trabajo	64
5.5.2	Visualización de resultados	66
5.6	Interfaz gráfica desarrollada	68

5.1 Descripción general

Esta herramienta se presenta como un sistema inteligente de apoyo a la organización quirúrgica, en el sentido más amplio de la palabra. Su diseño persigue un doble objetivo: (i) maximizar el rendimiento del bloque quirúrgico y (ii) reducir el tiempo dedicado por el personal a tareas repetitivas. Para ello, sería posible integrarla con los sistemas y bases de datos existentes en el hospital, y que diera apoyo a las tareas diarias del personal de forma que se evitaran duplicidades y se automatizaran procesos actualmente realizados de forma manual.

La solución se configura como un software especializado en la organización y programación quirúrgica, con un enfoque centrado en facilitar la toma de decisiones y en mejorar el aprovechamiento de los recursos, sin comprometer la calidad asistencial ni la sostenibilidad del sistema. No trata de reemplazar la toma de decisiones humanas, sino de complementarla mediante la generación de propuestas automáticas ajustadas a los criterios definidos por los responsables del bloque quirúrgico.

La herramienta se encarga de realizar una asignación automática de intervenciones a quirófanos y días, de forma que se pueda maximizar algún parámetro (número de operaciones, tiempo de uso, etc.) reduciendo el tiempo dedicado por el personal a programar intervenciones manualmente. Esta solución tiene en cuenta la incertidumbre inherente a la duración de las cirugías a la hora de realizar la agenda quirúrgica. Además, es capaz de adaptarse automáticamente a imprevistos, como cancelaciones de última hora o intervenciones que se alargan o acortan, para minimizar el tiempo perdido y el impacto sobre el resto de intervenciones.

5.1.1 Características y funcionalidades

A continuación, se detalla una lista de características y funcionalidades del sistema:

- El sistema **genera de forma rápida y automática una agenda quirúrgica que maximiza**, de forma matemática y estadística, **el rendimiento operativo del bloque quirúrgico**, ya sea en términos del número de intervenciones realizadas o del tiempo efectivo de uso.
- **Los datos** necesarios para el funcionamiento de la herramienta **se obtienen de forma automática de los sistemas y bases de datos existentes**, sin necesidad de que el personal duplique tareas.
- El sistema se ha diseñado como una **herramienta inteligente de apoyo a la toma de decisiones**, no como un sistema cerrado. Las agendas quirúrgicas generadas pueden ser revisadas y modificadas por el personal sanitario, incorporando su experiencia y

criterios clínicos. El objetivo no es sustituir, sino **potenciar la productividad y eficacia de los profesionales**.

- Este sistema permite a los coordinadores **supervisar en tiempo real** el desarrollo de las sesiones quirúrgicas, el estado actual de cada quirófano y consultar indicadores de rendimiento del bloque quirúrgico.
- Este sistema es **capaz de adaptarse dinámicamente ante imprevistos** (cancelaciones de última hora, retrasos, cirugías que se alargan o acortan), generando una agenda quirúrgica alternativa que minimiza el tiempo perdido y el impacto sobre el resto de intervenciones.

5.2 Objetivos de la herramienta

En el apartado anterior se han mencionado de forma general los objetivos que persigue esta herramienta. En este apartado se describen con mayor detalle, para comprender mejor el impacto esperado de su implementación en la organización y gestión del bloque quirúrgico. Concretamente, la herramienta persigue principalmente dos objetivos:

- **Maximizar el rendimiento del bloque quirúrgico.** Este objetivo se centra en mejorar el aprovechamiento de los quirófanos y del resto de recursos implicados en la actividad quirúrgica, permitiendo realizar un mayor número de intervenciones o aumentar el tiempo efectivo de uso de los quirófanos. Todo ello sin necesidad de ampliar la infraestructura existente ni de aumentar los horarios del personal. De esta manera, se facilita a la población el acceso a las intervenciones quirúrgicas, reduciendo los tiempos de espera y contribuyendo a disminuir la presión asistencial que habitualmente soportan estas áreas del hospital.
- **Reducir el tiempo dedicado por el personal a tareas repetitivas.** La herramienta busca minimizar la carga administrativa y el trabajo manual asociado a la organización del bloque quirúrgico, evitando que el personal sanitario tenga que introducir, copiar o reorganizar datos en múltiples sistemas o documentos. Actualmente, muchas de estas tareas se realizan de forma manual, lo que no solo consume tiempo, sino que también incrementa el riesgo de errores o incoherencias. Automatizar estos procesos libera tiempo que puede ser reorientado hacia actividades de mayor valor, como la atención clínica, la coordinación de equipos o la toma de decisiones estratégicas.

5.3 Esquema funcional

El desarrollo de la herramienta se ha basado en el análisis detallado de los procesos organizativos del bloque quirúrgico del HCUV. Esta información ha sido obtenida gracias a una serie de entrevistas en profundidad realizadas al coordinador de quirófanos del hospital, cuyo contenido y conclusiones se recogen en el TFG de Administración y Dirección de Empresas del autor.

En este apartado se presenta, en primer lugar, una descripción del proceso actual de programación quirúrgica llevado a cabo en el HCUV y, posteriormente, un diagrama de bloques que ilustra el esquema funcional de la herramienta desarrollada, destacando cómo se integran sus distintos componentes para dar apoyo a la toma de decisiones y a la gestión diaria del bloque quirúrgico.

5.3.1 Descripción del proceso de planificación

Identificar las principales fases del flujo de trabajo actual, permite trasladarlas a un entorno digital, de forma que se reproduzca su lógica organizativa, y se permita automatizar tareas, reducir la carga administrativa y optimizar el uso de los recursos disponibles. Además, diseñar una solución respetuosa con las dinámicas reales del hospital favorece su integración y su aceptación por parte del personal sanitario. Específicamente, el proceso de programación quirúrgica en el HCUV se articula en tres fases bien diferenciadas:

Primera fase: determinación del número de anestesistas disponibles. Esta fase está a cargo del Jefe de Servicio de Anestesiología, quien revisa la disponibilidad diaria de anestesistas. Este dato es clave, ya que cada quirófano que se pone en funcionamiento debe contar, como mínimo, con un anestesista asignado para poder operar con garantías de seguridad clínica, tal y como establece la Ley General de Sanidad (Ley 14/1986 del 25 de abril). La disponibilidad de anestesistas varía diariamente debido a turnos, guardias, vacaciones o bajas, por lo que no siempre coincide con la plantilla contratada. Como resultado, el número de quirófanos que pueden habilitarse cada día depende directamente del número de anestesistas disponibles en horario de actividad quirúrgica.

Segunda fase: asignación de quirófanos a los distintos servicios quirúrgicos. Una vez determinada la disponibilidad diaria de anestesistas, el coordinador de quirófanos (que en el caso del HCUV suele coincidir con el Jefe del Servicio de Anestesiología) procede al reparto de quirófanos entre las distintas especialidades. Esta asignación se realiza principalmente en función del volumen de pacientes en lista de espera de cada servicio, de modo que los servicios con mayor demanda (como traumatología) suelen recibir una mayor proporción de quirófanos. Aunque este reparto puede adaptarse puntualmente, en general permanece estable mes a mes, manteniendo una asignación

habitual para cada especialidad. Esta asignación constituye la base de la planificación mensual y se envía a los diferentes servicios del hospital el día 15 del mes anterior.

Tercera fase: programación de las intervenciones dentro de cada servicio quirúrgico. Con la asignación de quirófanos ya establecida, cada servicio quirúrgico organiza su propia agenda de intervenciones. El modo de proceder puede variar según el servicio: en algunos casos el Jefe de Servicio gestiona directamente la programación, mientras que en otros son los propios cirujanos quienes introducen sus operaciones en el sistema. En esta etapa se consideran factores como la disponibilidad del personal, la prioridad clínica, la complejidad de las cirugías y la duración estimada de cada intervención.

Respecto a los plazos, el proceso completo se planifica con un mes de antelación. El reparto de quirófanos se realiza el día 15 del mes previo, lo que implica que la disponibilidad de anestesistas debe estimarse antes de esa fecha. A partir de ahí, cada servicio dispone de un margen temporal para confeccionar su programación interna, de forma que todas las intervenciones queden agendadas con la antelación suficiente.

Este flujo de trabajo secuencial y estructurado constituye la base sobre la que se ha diseñado la herramienta propuesta, respetando la lógica y los roles actuales para facilitar su implementación en un entorno hospitalario real.

5.3.2 Diagrama de bloques de la herramienta

El funcionamiento general de la herramienta puede explicarse mediante un diagrama de bloques, representado en la Figura 6, que recoge las principales unidades que conforman el sistema. Estas unidades permiten comprender cómo fluye la información desde su captación hasta su presentación final al usuario.

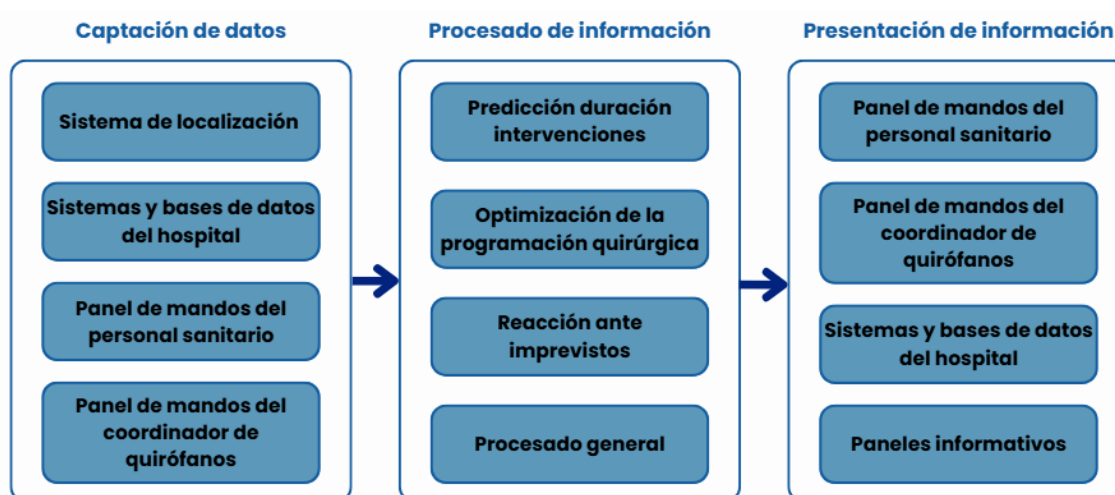


Figura 6: Diagrama de bloques del funcionamiento de la herramienta.

La arquitectura se organiza en tres unidades funcionales:

1. **Captación de datos.** Esta unidad se encarga de recoger toda la información relevante del entorno quirúrgico, y está compuesta por los siguientes bloques funcionales:
 - **Sistemas y bases de datos del hospital.** La herramienta se integra directamente con los sistemas de información hospitalaria ya implantados, permitiendo la recogida automática de datos clínicos, quirúrgicos y de agenda. Esto evita duplicidades, minimiza errores de transcripción y reduce la carga administrativa. Además, los datos generados por la herramienta pueden exportarse e integrarse nuevamente en los sistemas del hospital.
 - **Panel de mandos del personal sanitario.** Interfaz que permite a los profesionales consultar su agenda quirúrgica, indicar su disponibilidad horaria, turnos y pacientes asignados. Además, sirve como punto de interacción para revisar y ajustar la programación propuesta por el sistema.
 - **Panel de mandos del coordinador de quirófanos.** Interfaz destinada al coordinador del bloque quirúrgico, que permite supervisar el estado en tiempo real de los quirófanos, acceder a la planificación completa y consultar indicadores de rendimiento.
2. **Procesado de la información.** En esta unidad se lleva a cabo el tratamiento de los datos recopilados, con el fin de generar propuestas de programación quirúrgica optimizadas. Está formada por los siguientes bloques:
 - **Predicción de la duración de intervenciones.** A partir del histórico de datos recogidos por el sistema, se aplican algoritmos de *machine learning* para estimar la duración de cada intervención quirúrgica con un alto grado de precisión.
 - **Algoritmo de optimización de la programación quirúrgica.** Este módulo utiliza las predicciones de duración y toda la información contextual (disponibilidad de quirófanos, turnos del personal, prioridades clínicas, etc.) para generar automáticamente una agenda quirúrgica inicial, que puede modificarse de acuerdo a los criterios del personal sanitario y cuyo objetivo es maximizar el uso de los recursos disponibles.
 - **Algoritmo de reacción ante imprevistos.** Permite ajustar dinámicamente la planificación cuando surgen desviaciones con respecto al plan inicial, como cancelaciones, retrasos o finalizaciones anticipadas. El sistema propone modificaciones automáticas para minimizar los tiempos muertos y el impacto sobre la jornada quirúrgica.

3. Presentación de la información. Una vez procesados los datos, el sistema presenta la información a través de distintas interfaces y canales, permitiendo su visualización por parte del personal del hospital. Esta unidad está formada por:

- **Panel de mandos del personal sanitario y panel del coordinador de quirófanos.** Ambos se actualizan en tiempo real y permiten una supervisión continua del estado del bloque quirúrgico, así como la consulta y edición de la programación.
- **Sistemas y bases de datos del hospital.** Los datos generados pueden ser integrados de nuevo en los sistemas centrales del hospital.

5.4 Requisitos

Este apartado recoge los requisitos que debe cumplir la herramienta de apoyo a la organización quirúrgica, tanto desde el punto de vista funcional como técnico. Los requisitos definen qué funcionalidades debe ofrecer el sistema (requisitos funcionales) y cómo debe comportarse en términos de rendimiento, usabilidad, seguridad y otros aspectos de calidad (requisitos no funcionales). Su correcta definición es fundamental para garantizar el éxito en el diseño y desarrollo de la solución.

5.4.1 Requisitos funcionales

A continuación, se enumeran los requisitos funcionales (RF) que debe cumplir la herramienta:

- **RF-01:** El sistema deberá permitir generar de forma automática una agenda quirúrgica optimizada que maximice el número de intervenciones o el tiempo efectivo de uso de los quirófanos.
- **RF-02:** El sistema deberá integrarse con las bases de datos y sistemas de información hospitalaria existentes para obtener y volcar datos de forma automática.
- **RF-03:** El sistema deberá permitir la visualización, modificación y validación de la agenda quirúrgica por parte del personal sanitario autorizado.
- **RF-04:** El sistema deberá permitir al personal sanitario indicar su disponibilidad horaria y turnos, así como consultar sus agendas.
- **RF-05:** El sistema deberá predecir la duración estimada de cada intervención quirúrgica, utilizando algoritmos de inteligencia artificial.

- **RF-06:** El sistema deberá adaptar la agenda quirúrgica en tiempo real ante cancelaciones, retrasos o cambios imprevistos.
- **RF-08:** El sistema deberá generar indicadores de rendimiento del bloque quirúrgico accesibles a través de un panel para el coordinador.
- **RF-10:** El sistema deberá incorporar interfaces diferenciadas para los distintos perfiles de usuario (cirujano, anestesista, enfermería, coordinador, etc.).
- **RF-12:** El sistema deberá permitir al coordinador del bloque quirúrgico visualizar en tiempo real la situación de cada quirófano y las operaciones en curso o previstas.

5.4.2 Requisitos no funcionales

A continuación, se presentan los requisitos no funcionales (RNF), que describen propiedades del sistema que afectan a su rendimiento, calidad y experiencia de uso:

- **RNF-01:** El sistema deberá ser accesible desde cualquier navegador web moderno y compatible con diferentes dispositivos (ordenadores de sobremesa, *tablets*, etc.).
- **RNF-02:** El sistema deberá ofrecer una interfaz intuitiva y adaptada a los distintos perfiles profesionales, facilitando el uso por parte del personal sanitario sin necesidad de formación extensa.
- **RNF-03:** El sistema deberá responder con un tiempo de latencia inferior a 2 segundos en operaciones comunes (consultar agenda, editar, reprogramar).
- **RNF-04:** El sistema deberá estar disponible de forma continua durante el horario de funcionamiento del bloque quirúrgico (salvo durante tareas programadas de mantenimiento).
- **RNF-05:** El sistema deberá garantizar la confidencialidad e integridad de los datos personales y clínicos, cumpliendo con la Ley General de Protección de Datos (LGPD).
- **RNF-06:** El sistema deberá registrar de forma segura toda la actividad del usuario (logs) para garantizar la trazabilidad de las operaciones.
- **RNF-07:** El sistema deberá integrarse con mecanismos de autenticación existentes en el hospital para garantizar un acceso seguro.

5.5 Resolución del problema de optimización

El proceso de programación quirúrgica ha sido modelado como un problema matemático de optimización, donde el objetivo es asignar intervenciones a quirófanos y días de forma que se maximice el uso de los recursos disponibles respetando al mismo tiempo todas las restricciones organizativas, clínicas y logísticas del hospital.

Para implementar y resolver este modelo en la práctica, ha sido necesario traducir el problema matemático a un lenguaje de programación, definir el entorno computacional de trabajo, y posteriormente interpretar los resultados que ofrece el solucionador matemático. En este apartado se describen ambos pasos: por un lado, la preparación y ejecución computacional del modelo y, por otro, la interpretación de los resultados obtenidos y su visualización en la herramienta.

5.5.1 Entorno de trabajo

Antes de poder resolver el problema de optimización quirúrgica, es necesario tomar una serie de decisiones previas relacionadas con el entorno informático y la infraestructura computacional en la que se va a trabajar.

Equipo tecnológico: Lenovo IdeaPad S145

Para llevar a cabo el desarrollo del código, la ejecución de los modelos y, en definitiva, la resolución completa del problema de optimización quirúrgica, ha sido necesario disponer de un equipo informático con unas prestaciones adecuadas. En este caso, el trabajo se ha realizado utilizando un portátil Lenovo IdeaPad S145, equipado con un procesador Intel® Core™ i5-8625U CPU a 1,60 GHz (con turbo hasta 1,8 GHz), 8 GB de memoria RAM y sistema operativo Windows de 64 bits. Estas características han resultado suficientes para modelar, ejecutar y analizar los distintos escenarios contemplados en este TFG con tiempos de resolución aceptables y una experiencia de desarrollo fluida.

Lenguaje de programación: Python

Para que un ordenador pueda resolver un problema matemático de optimización, es necesario traducir dicho problema a un lenguaje de programación, de forma que pueda ser evaluado y resuelto computacionalmente.

Aunque existen múltiples lenguajes de programación adecuados para este tipo de tareas (como C++, Java o MATLAB), en este trabajo se ha optado por utilizar Python. Esta decisión se ha basado en varios factores: su sintaxis clara y accesible, su amplia comunidad de desarrolladores, la gran cantidad de librerías disponibles para tareas de análisis de datos, su buen rendimiento para tareas de computación intensiva y, principalmente, su conocimiento detallado por parte del autor. Además, Python es un

lenguaje de uso libre y gratuito, lo que lo convierte en una opción muy accesible tanto en entornos académicos como profesionales.

Entorno de desarrollo: PyCharm

Para facilitar el proceso de programación, depuración y organización del código, se ha utilizado un entorno de desarrollo integrado (*Integrated Development Environment*, IDE). Los IDE permiten al desarrollador trabajar de forma más eficiente al proporcionar funcionalidades como resaltado de sintaxis, autocompletado, gestión de proyectos, integración con sistemas de control de versiones, y herramientas para la ejecución y depuración del código.

En este caso, el entorno elegido ha sido PyCharm, desarrollado por JetBrains, por su compatibilidad con Python, su interfaz intuitiva y su capacidad para integrar fácilmente bibliotecas externas.

Solver: Gurobi Optimizer

Un *solver* es una herramienta informática especializada en resolver problemas matemáticos de optimización. Estas herramientas permiten evaluar las variables, restricciones y función objetivo definidas en el código, y proporcionar la solución óptima del problema (si esta existe), en base a los criterios especificados.

En este trabajo se ha utilizado la herramienta Gurobi, una de las más potentes y utilizadas en el ámbito académico e industrial. Su compatibilidad con el lenguaje de programación Python y la disponibilidad de licencia académica gratuita, han sido factores determinantes en su elección. En concreto, se ha empleado la versión Gurobi Optimizer 12.0.1, integrada mediante la interfaz GurobiPy para Python.

A continuación, se resumen las principales líneas de código utilizadas para la formulación y resolución del modelo de optimización quirúrgica:

- `modelo = Model()`: crea una instancia del modelo de optimización.
- `modelo.addVar(...)`: define una variable del modelo, especificando su tipo (binaria, entera o continua), su dimensión y su nombre.
- `modelo.setObjective(...)`: define la función objetivo, que puede ser maximizada (GRB.MAXIMIZE) o minimizada (GRB.MINIMIZE), en función del criterio de optimización establecido.
- `modelo.addConstr(...)`: añade una restricción al modelo, indicando la expresión matemática correspondiente y su identificador.

- *modelo.optimize()*: ejecuta el *solver* sobre el modelo definido, devolviendo la solución óptima, si existe.

Estas líneas constituyen la base del proceso de resolución del problema, sobre las que se han construido estructuras más complejas para modelar los distintos escenarios y restricciones propios del entorno quirúrgico hospitalario.

5.5.2 Visualización de resultados

Una vez que el problema matemático ha sido formulado y traducido a código utilizando Python, y el *solver* Gurobi ha resuelto el modelo, se obtiene una solución óptima en forma de valores para las variables de decisión. Esta solución representa la propuesta de asignación quirúrgica que maximiza el uso de los recursos disponibles, cumpliendo todas las restricciones impuestas.

En concreto, todos los modelos desarrollados en este trabajo utilizan dos variables de decisión, que son las que Gurobi optimiza:

- X_{pqd} : variable binaria que toma el valor 1 si el paciente p es programado para ser operado en el quirófano q el día d , y 0 en caso contrario.
- Z_{cqd} : variable binaria que toma el valor 1 si el cirujano c está asignado al quirófano q el día d , y 0 en caso contrario.

A partir del valor que toman estas variables tras la optimización, se puede reconstruir la agenda quirúrgica completa.

Por ejemplo, para un caso sencillo con 10 pacientes, 2 quirófanos, 4 cirujanos y 2 días, una capacidad temporal de 480 minutos tanto para los quirófanos como para los cirujanos y un tiempo de rotación de 15 minutos, la solución proporcionada por el *solver* para el caso del modelo base se puede representar inicialmente en forma de tabla, en la que se visualiza directamente qué valores toman las variables X_{pqd} y Z_{cqd} . En las Tabla 8 y Tabla 9 se muestran los valores obtenidos para las variables de decisión.

	Quirófano 1 – Día 1	Quirófano 1 – Día 2	Quirófano 2 – Día 1	Quirófano 2 – Día 2
Paciente 1	$X_{000} = 0$	$X_{001} = 0$	$X_{010} = 0$	$X_{011} = 1$
Paciente 2	$X_{100} = 1$	$X_{101} = 0$	$X_{110} = 0$	$X_{111} = 0$
Paciente 3	$X_{200} = 0$	$X_{201} = 0$	$X_{210} = 1$	$X_{211} = 0$
Paciente 4	$X_{300} = 0$	$X_{301} = 1$	$X_{310} = 0$	$X_{311} = 0$
Paciente 5	$X_{400} = 0$	$X_{401} = 0$	$X_{410} = 1$	$X_{411} = 0$
Paciente 6	$X_{500} = 0$	$X_{501} = 0$	$X_{510} = 1$	$X_{511} = 0$
Paciente 7	$X_{600} = 1$	$X_{601} = 0$	$X_{610} = 0$	$X_{611} = 0$
Paciente 8	$X_{700} = 0$	$X_{701} = 0$	$X_{710} = 1$	$X_{711} = 0$
Paciente 9	$X_{800} = 1$	$X_{801} = 0$	$X_{810} = 0$	$X_{811} = 0$
Paciente 10	$X_{900} = 0$	$X_{901} = 0$	$X_{910} = 0$	$X_{911} = 1$

Tabla 8: Valores obtenidos de la variable de decisión X_{pqd} .

	Quirófano 1 – Día 1	Quirófano 1 – Día 2	Quirófano 2 – Día 1	Quirófano 2 – Día 2
Cirujano 1	$Z_{000} = 0$	$Z_{001} = 0$	$Z_{010} = 1$	$Z_{011} = 0$
Cirujano 2	$Z_{100} = 1$	$Z_{101} = 0$	$Z_{110} = 0$	$Z_{111} = 0$
Cirujano 3	$Z_{200} = 1$	$Z_{201} = 0$	$Z_{210} = 0$	$Z_{211} = 1$
Cirujano 4	$Z_{300} = 0$	$Z_{301} = 1$	$Z_{310} = 0$	$Z_{311} = 0$

Tabla 9: Valores obtenidos de la variable de decisión Z_{cqd} .

Estas tablas permiten verificar la coherencia del resultado y sirve como base para la interpretación de la propuesta generada. Tal y como se observa en la Tabla 8, correspondiente a los valores obtenidos de la variable de decisión X_{pqd} , cada paciente ha sido programado para ser intervenido una única vez, lo que confirma que el modelo respeta la restricción de unicidad en la asignación de intervenciones. Además, en la Tabla 9, que muestra los valores de la variable de decisión Z_{cqd} , puede apreciarse que todos los cirujanos han operado únicamente un día, salvo el cirujano 3, que ha sido asignado a dos jornadas quirúrgicas distintas.

Para facilitar su comprensión, la solución también puede reescribirse en un formato más amigable, como en la Tabla 10 que muestra un resumen en el que se indica de forma explícita qué paciente será operado, en qué quirófano y en qué día, junto con el cirujano asignado.

Finalmente, la herramienta desarrollada incorpora una interfaz gráfica que permite representar visualmente la solución en forma de cronograma, lo que facilita la comprensión global del plan quirúrgico. Este cronograma muestra, para cada quirófano y día, la secuencia de intervenciones asignadas. En las Figura 7 y Figura 8 se presenta un ejemplo del cronograma generado por la aplicación para el caso anteriormente descrito.

El paciente 1 es operado por el cirujano 3 el día 2 en el quirófano 2.
El paciente 2 es operado por el cirujano 3 el día 1 en el quirófano 1.
El paciente 3 es operado por el cirujano 1 el día 1 en el quirófano 2.
El paciente 4 es operado por el cirujano 4 el día 2 en el quirófano 1.
El paciente 5 es operado por el cirujano 1 el día 1 en el quirófano 2.
El paciente 6 es operado por el cirujano 4 el día 1 en el quirófano 2.
El paciente 7 es operado por el cirujano 3 el día 1 en el quirófano 1.
El paciente 8 es operado por el cirujano 1 el día 1 en el quirófano 2.
El paciente 9 es operado por el cirujano 2 el día 1 en el quirófano 1.
El paciente 10 es operado por el cirujano 3 el día 2 en el quirófano 2.

Tabla 10: Resumen de la agenda quirúrgica generada.

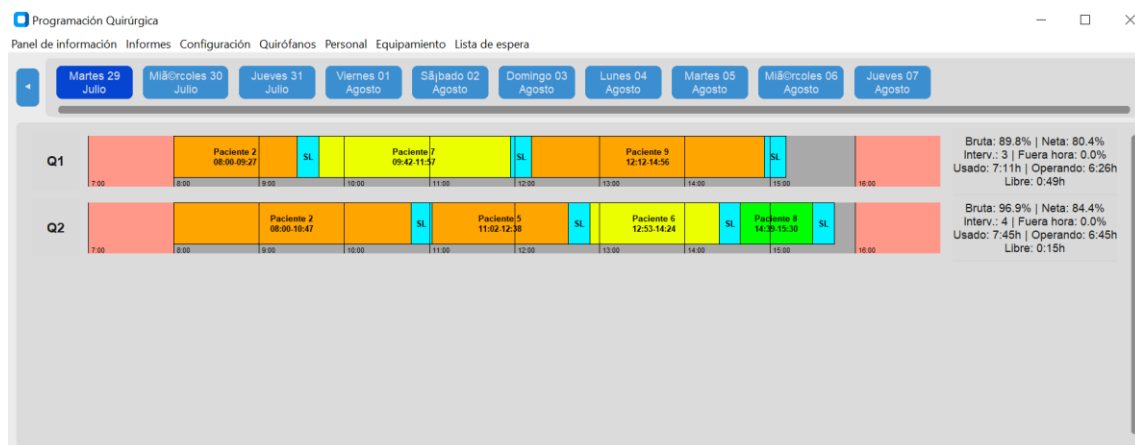


Figura 7: Cronograma generado para el día 1.

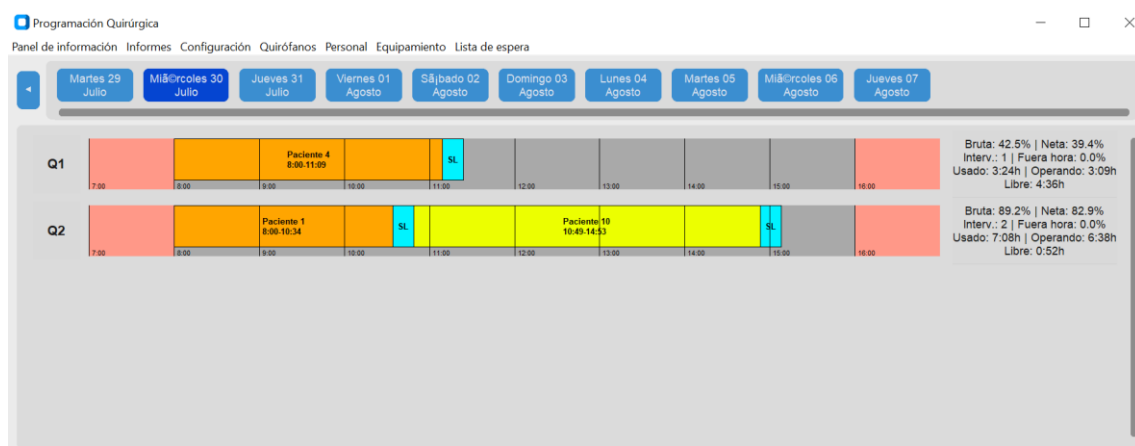


Figura 8: Cronograma generado para el día 2.

5.6 Interfaz gráfica desarrollada

El propósito principal de la interfaz desarrollada en este trabajo es permitir la visualización de las agendas quirúrgicas generadas por el algoritmo de optimización. Sin embargo, debe destacarse que esta interfaz preliminar no responde a las necesidades funcionales que debe cubrir la herramienta de apoyo a la organización quirúrgica diseñada. Para ser utilizada de forma operativa en un entorno hospitalario real, la herramienta debería incluir funcionalidades adicionales que permitan al personal sanitario introducir información relativa a su disponibilidad, turnos o pacientes asignados, entre otros. Estas funcionalidades, junto a una mejora de la interfaz actual, serán desarrolladas como parte del TFM de Ingeniería de Telecomunicación del autor. La interfaz actual se limita a procesar y mostrar los resultados del modelo matemático de forma visual, sin capacidad de interacción ni modificación por parte del usuario.

Pese a su simplicidad, esta interfaz básica permite representar de manera clara la secuencia de intervenciones asignadas a cada quirófano, facilitando la interpretación de

los resultados. Además, calcula automáticamente diversos indicadores de rendimiento, como el porcentaje de ocupación o el número de intervenciones por quirófano, a partir de los datos de programación generados.

En la Figura 9 se puede observar una captura de la pantalla principal de la herramienta en la que se distinguen cuatro secciones claramente diferenciadas.

- En primer lugar, se incluye un apartado destinado a la selección del día dentro del horizonte temporal considerado (10 días en este caso). Esta sección permite al usuario visualizar la agenda quirúrgica correspondiente a cada jornada, resaltando mediante un color más oscuro el día seleccionado. Asimismo, es posible acceder a días anteriores con el fin de consultar información histórica de la programación.
- Justo debajo se encuentra la sección de mayor tamaño, donde se representan los cronogramas correspondientes a cada quirófano para el día seleccionado. Cada cronograma muestra las intervenciones programadas mediante bloques de distinto color, en función del nivel de riesgo asociado (varianza estimada) a la duración de la intervención. Para ello se emplea una codificación cromática con cuatro niveles: verde, amarillo, naranja y rojo, que representan de menor a mayor probabilidad de sobrepasar el tiempo previsto. Adicionalmente, en el margen derecho de cada cronograma se incluye un panel específico con indicadores de rendimiento del quirófano en cuestión, mostrando parámetros como la eficiencia bruta y neta, el número de intervenciones asignadas, el tiempo libre, el tiempo usado y el tiempo en operación.
- En la parte inferior izquierda se muestra una sección de estadísticas generales que resume el rendimiento global de la agenda quirúrgica del día, integrando la información de todos los quirófanos. Entre los indicadores que se presentan destacan el índice de ocupación bruto y neto, el número total de intervenciones, el tiempo medio de intervención, los tiempos totales de quirófanos ocupados y libres, el tiempo operando y el número de cancelaciones registradas.
- Finalmente, en el lado inferior derecho de la interfaz se sitúa un panel de notificaciones, donde se recoge información relevante relativa a las intervenciones y mensajes generados por la herramienta. Este espacio cumple una función de apoyo al usuario, al centralizar avisos e incidencias que puedan ser de utilidad para la gestión de la agenda quirúrgica.

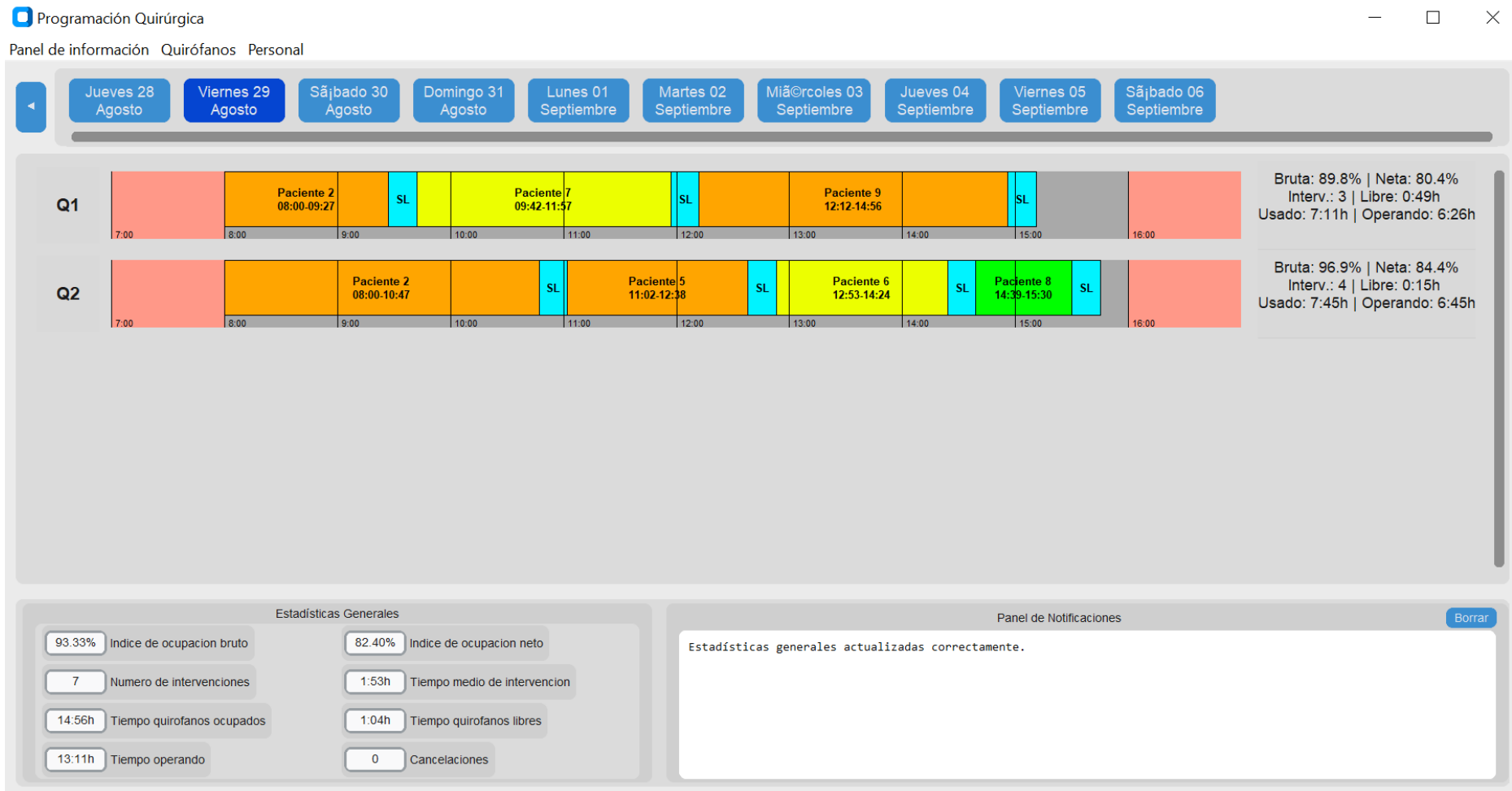


Figura 9: Pantalla principal de la herramienta de apoyo a la organización quirúrgica.

En la parte superior de la pantalla principal se dispone de una barra de submenús que permite acceder a distintas funcionalidades de la herramienta. Entre ellos destacan el submenú de quirófanos y el submenú de personal, ambos orientados a la gestión de los recursos necesarios para la programación quirúrgica.

En la Figura 10 se muestra la ventana correspondiente al **submenú de quirófanos**. El objetivo de esta sección es introducir y modificar la información relativa a la disponibilidad y capacidad de los distintos quirófanos. Para cada día del horizonte temporal considerado, el usuario puede seleccionar qué quirófanos se encuentran operativos y, en caso necesario, ajustar sus horarios de funcionamiento. De este modo, la herramienta permite reflejar posibles restricciones derivadas de la gestión hospitalaria, como el cierre temporal de un quirófano o la reducción de su jornada por motivos organizativos o técnicos.

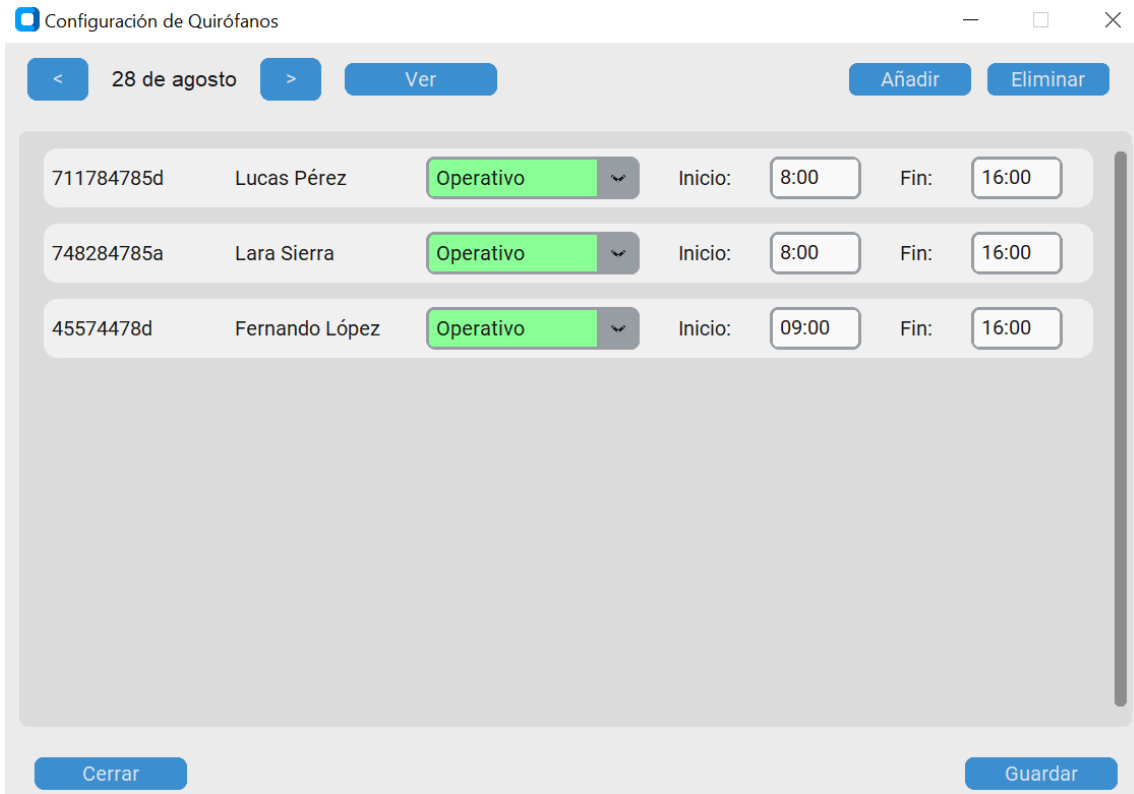
The screenshot shows a window titled "Configuración de Quirófanos" with a date selector set to "28 de agosto". The window contains a table with four rows, each representing an operating room (Q1, Q2, Q3, Q4). Each row has a status dropdown menu, a start time field, and an end time field. The status for Q1 and Q2 is "Operativo" (green), while for Q3 and Q4 it is "No Operativo" (red). The start times are 8:00 for Q1 and Q2, and 08:00 for Q3 and Q4. The end times are 16:00 for all. Buttons for "Añadir", "Eliminar", "Ver", "Cerrar", and "Guardar" are visible.

Quirófano	Estado	Inicio	Fin
Q1	Operativo	8:00	16:00
Q2	Operativo	8:00	16:00
Q3	No Operativo	08:00	16:00
Q4	No Operativo	08:00	16:00

Figura 10: Ventana del submenú de quirófanos de la herramienta de apoyo a la organización quirúrgica.

De forma análoga, en la Figura 11 se representa la ventana asociada al **submenú de personal**. Esta sección está destinada a la configuración de la disponibilidad de los profesionales (cirujanos) y de su jornada laboral. El usuario puede establecer qué miembros del equipo se encuentran disponibles en cada jornada, así como definir los horarios en los que prestarán servicio. Esta funcionalidad resulta esencial para adaptar la programación quirúrgica a la realidad del personal sanitario, incorporando tanto las

restricciones laborales como la posible variabilidad en su asignación a lo largo del horizonte temporal.



The screenshot shows a web application window titled "Configuración de Quirófanos". At the top, there is a navigation bar with a date selector set to "28 de agosto", a "Ver" button, and "Añadir" and "Eliminar" buttons. Below this is a table with three rows of surgeon data. Each row includes an ID, a name, a status dropdown set to "Operativo", and start/end time inputs. At the bottom of the window are "Cerrar" and "Guardar" buttons.

ID	Nombre	Estado	Inicio	Fin
711784785d	Lucas Pérez	Operativo	8:00	16:00
748284785a	Lara Sierra	Operativo	8:00	16:00
45574478d	Fernando López	Operativo	09:00	16:00

Figura 11: Ventana del submenú de personal de la herramienta de apoyo a la organización quirúrgica.

En la Figura 12 se presenta un ejemplo adicional de la pantalla principal de la herramienta en un escenario con un mayor número de quirófanos disponibles (seis en este caso). En esta visualización se aprecia cómo la interfaz se adapta automáticamente al incremento de recursos representados manteniendo la claridad en la disposición de los cronogramas. Asimismo, en este ejemplo el panel de información se muestra sin desplegar, lo que permite disponer de un área más amplia para la representación gráfica de las agendas quirúrgicas.

En definitiva, aunque la interfaz gráfica desarrollada supone una versión preliminar y de carácter básico, resulta plenamente funcional para llevar a cabo y visualizar las operaciones fundamentales de la herramienta. Permite tanto la representación de las agendas quirúrgicas generadas por el modelo de optimización y la configuración de los parámetros de entrada como el cálculo y consulta de los principales indicadores de rendimiento, proporcionando una base sólida sobre la que se podrán implementar mejoras y funcionalidades avanzadas en futuros desarrollos.

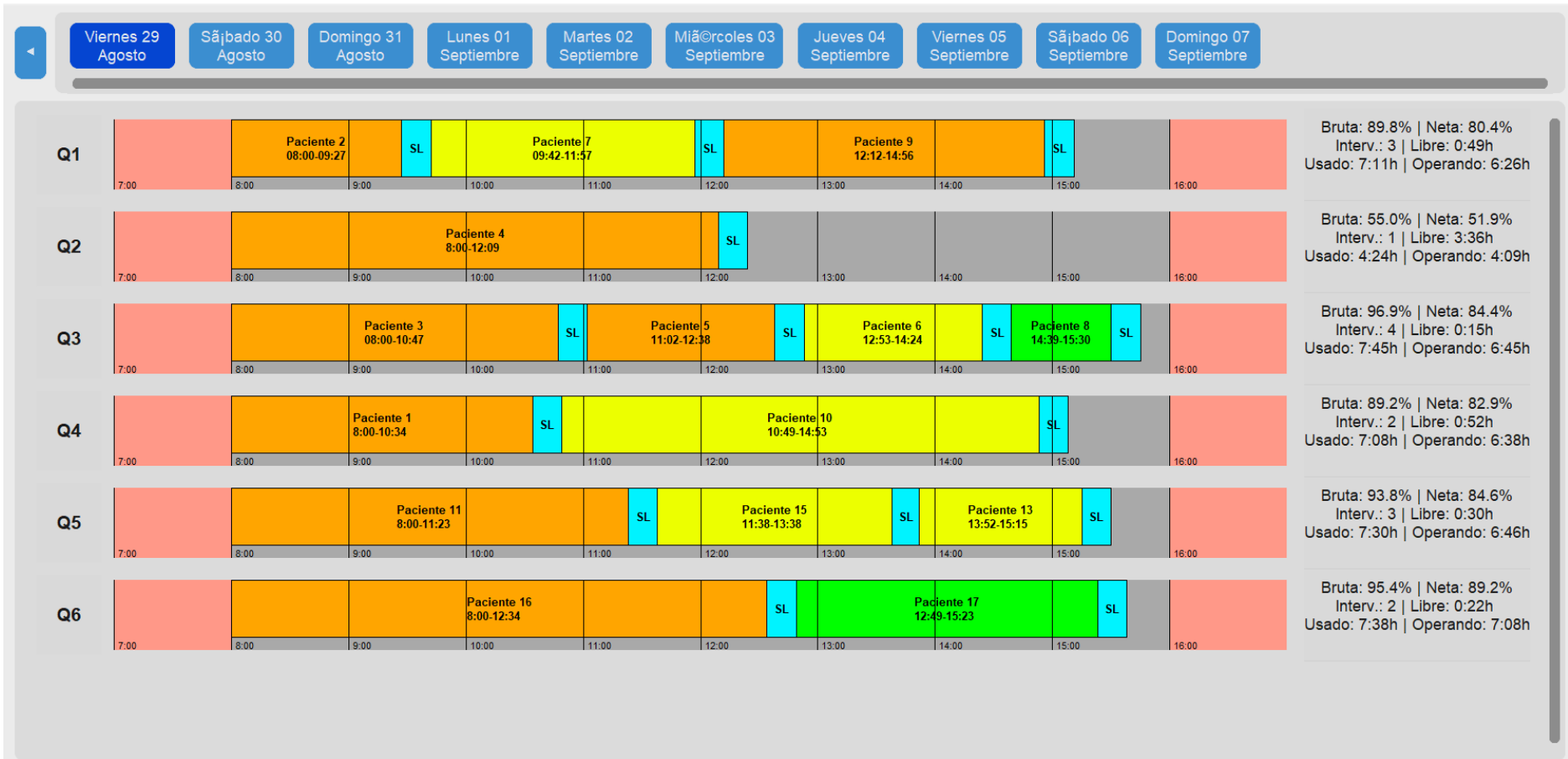


Figura 12: Pantalla principal de la herramienta de apoyo a la organización quirúrgica con 6 quirófanos disponibles.

Capítulo 6: Generación de datos sintéticos

6.1	Introducción.....	75
6.2	Definición de conjuntos.....	75
6.3	Definición de variables auxiliares	77

6.1 Introducción

En el desarrollo de herramientas de apoyo a la programación quirúrgica, uno de los principales obstáculos es la falta de acceso a bases de datos reales que incluyan información detallada sobre listas de espera, tipos de intervención, duración estimada o fecha límite para operar a cada paciente. Esta limitación obliga a recurrir a la generación de datos sintéticos que simulen con realismo las condiciones del entorno hospitalario. Este enfoque no solo permite evaluar el comportamiento del modelo bajo diferentes escenarios, sino que también es una práctica habitual en la literatura científica sobre planificación quirúrgica. Así lo demuestra, por ejemplo, el trabajo de (Molina-Pariente, et al., 2015) en el artículo *New heuristics for planning operating rooms*, donde se construyen bancos de pruebas específicos a partir de datos generados artificialmente para validar las soluciones propuestas. Además, en dicho trabajo se incluye una revisión de la literatura que pone de manifiesto cómo numerosos autores recurren a la generación de datos sintéticos a partir de distintas distribuciones, medias y varianzas para poder evaluar sus modelos.

6.2 Definición de conjuntos

Con el objetivo de poder resolver instancias concretas del modelo de programación quirúrgica propuesto, es necesario asignar valores específicos a los conjuntos definidos durante su formulación. A continuación, se describe el procedimiento seguido para determinar la dimensión de cada uno de ellos en función de criterios realistas y ajustados al contexto hospitalario.

- **Pacientes (p).** Corresponde al total de intervenciones acumuladas en la lista de espera para el horizonte temporal considerado. Para simular una carga de trabajo coherente, se van a utilizar dos escenarios: uno en el que la suma de las duraciones estimadas de las intervenciones en lista de espera supone un porcentaje del **50 %** respecto a la capacidad total de los quirófanos disponibles y otro en el que el porcentaje es del **200 %**. Con esto se pretende observar el comportamiento del modelo en distintas situaciones de saturación.
- **Quirófanos (q).** Se plantean tres escenarios con distinta disponibilidad de quirófanos: **2, 4 y 6** unidades. Estas combinaciones permiten evaluar la respuesta del modelo ante diferentes disponibilidades de quirófanos. La elección de estos valores obedece a una aproximación realista del contexto hospitalario. En hospitales de gran tamaño y alta actividad quirúrgica, como el HCUV, es habitual disponer de más de 20 quirófanos en total. Sin embargo, la distribución de estos recursos se realiza entre los distintos servicios quirúrgicos en función de su carga asistencial y de las listas de espera, de

manera que cada servicio gestiona únicamente una fracción de ellos. En este sentido, resulta poco probable que un único servicio tenga asignados más de 6 quirófanos simultáneamente. Por este motivo, el rango considerado en el presente análisis (2, 4 y 6 quirófanos) se ajusta a una situación representativa de la práctica hospitalaria, en la que cada especialidad debe organizar su actividad con un número limitado de quirófanos dentro de un bloque quirúrgico compartido.

- **Días (*d*).** El horizonte temporal sobre el que se realizará la programación se analiza en tres configuraciones distintas: **1, 3 y 5 días**. Conviene aclarar que no debe confundirse el **horizonte temporal de la planificación** con el **horizonte temporal de la programación**. El primero hace referencia al periodo para el cual el coordinador de quirófanos distribuye los recursos entre los distintos servicios quirúrgicos (en el caso del HCUV, este horizonte es de aproximadamente un mes). En cambio, el horizonte temporal de programación corresponde al periodo en el que cada servicio quirúrgico define qué intervenciones se realizarán en cada quirófano y día. Este último depende tanto de la organización del servicio como de las características clínicas de cada intervención. En la literatura especializada es común realizar la programación para un horizonte temporal de 5 días (Molina-Pariente, et al., 2015), aunque también hay trabajos que utilizan 1 día (Jebali, et al., 2006) y hasta un máximo de 10 días (Ozkarahan, 2000). En el HCUV este valor suele situarse entre 1 y 2 semanas. Para la comparativa general entre modelos se ha considerado un horizonte temporal de programación de **10 días**, equivalente a dos semanas excluyendo los fines de semana (días en los que habitualmente no se realizan intervenciones de cirugía programada). Este valor máximo se ha empleado con el objetivo de analizar el desempeño de los modelos en un escenario más amplio. Para el resto de análisis, se han utilizado las tres configuraciones descritas inicialmente (1, 3 y 5 días), que permiten observar el efecto de la flexibilidad temporal en el rendimiento de la programación.
- **Cirujanos (*c*).** Representa el número de profesionales disponibles para realizar intervenciones quirúrgicas durante el horizonte temporal considerado. No se han encontrado fuentes oficiales que indiquen un valor estándar del número de cirujanos en plantilla por quirófano. No obstante, pueden utilizarse estimaciones indirectas como referencia. Por ejemplo, el Hospital Clínic de Barcelona dispone de más de 40 quirófanos y una plantilla de más de 700 profesionales en su área quirúrgica, incluyendo médicos, enfermería y personal de apoyo (Hospital Clínic de Barcelona, 2025). Si se asume que aproximadamente un tercio de este personal corresponde a cirujanos, se obtendría una cifra estimada de 230 cirujanos, lo que supondría una media de entre **5 y 6** cirujanos por quirófano. Aunque esta estimación no puede generalizarse a todos los hospitales, sirve como guía razonable para definir el conjunto de cirujanos en las instancias realizadas.

6.3 Definición de variables auxiliares

Además de los conjuntos, la correcta generación de las instancias del modelo requiere definir una serie de variables auxiliares que complementan la caracterización del problema. A continuación, se detalla la asignación de valores a cada una de ellas:

- **Capacidad temporal de los quirófanos (r_{qd}).** Se establece una capacidad homogénea para todos los quirófanos, fijando una jornada diaria de 8 horas (480 minutos) disponibles para intervenciones quirúrgicas programadas. Este valor se mantiene constante en todos los días del horizonte temporal.
- **Capacidad temporal de los cirujanos (α_{cd}).** Cada cirujano dispondrá igualmente de una capacidad diaria de 8 horas (480 minutos) de trabajo, coincidiendo con el horario en el que los quirófanos están disponibles.
- **Cirujano asignado a cada paciente (δ_p).** Se asigna a cada paciente un cirujano responsable de su intervención. Esta asignación se realiza mediante una distribución uniforme discreta sobre el conjunto total de cirujanos disponibles, simulando un reparto aleatorio y homogéneo de la carga asistencial.
- **Duración del tiempo de rotación (Δ).** Se reserva un tiempo fijo entre intervenciones consecutivas en un mismo quirófano para la limpieza y preparación del entorno quirúrgico. Este valor se puede fijar, por ejemplo, en 15 minutos, siendo independiente del tipo de operación realizada.
- **Día límite para realizar la intervención (L_p).** Para cada paciente se asigna el último día en que puede ser intervenido siguiendo una distribución uniforme entre el triple de los días en los que se realiza la planificación.
- **Nivel de confianza del modelo 4 (β).** Este parámetro se utiliza en el modelo 4 para limitar la probabilidad de que una sesión quirúrgica se extienda más allá del horario previsto. En las simulaciones base, se ha fijado en un 95 %, lo que implica que se acepta un margen de riesgo del 5 % de sobreutilización por sesión quirúrgica.

Para la generación de datos sintéticos relativos a la duración de las intervenciones quirúrgicas, se han tomado como base los estudios de Molina-Pariente et al. (2015) y Gomes et al. (2012). Ambos trabajos coinciden en que la distribución log-normal es la más adecuada para modelar la duración de las intervenciones quirúrgicas, dada su capacidad para representar de forma realista la asimetría y dispersión que caracteriza a estos datos. En la Figura 13 se puede observar una representación de una distribución log-normal utilizada para modelar la duración de las intervenciones quirúrgicas. Se aprecia claramente su asimetría, con una cola más larga hacia la derecha, lo que indica que es

más probable que las intervenciones se alarguen respecto a su duración media a que finalicen antes de lo previsto. En particular, el estudio de Molina-Pariente et al. proporciona una guía práctica para generar datos simulados que reflejen tanto la duración media como su variabilidad (Gomes, et al., 2012) (Molina-Pariente, et al., 2015).

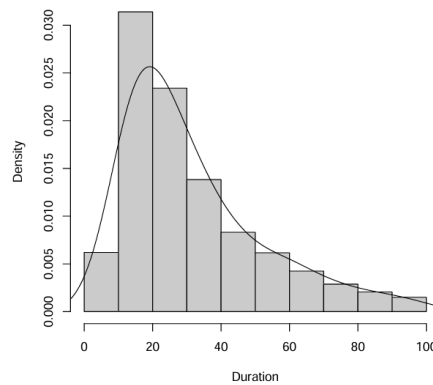


Figura 13: Representación de la distribución log-normal de la duración quirúrgica (Gomes, et al., 2012).

- **Duración estimada de la intervención (t_p).** Cada intervención tiene asociada una duración aproximada, expresada en minutos. Este valor se genera de forma aleatoria siguiendo una distribución uniforme entre 60 y 240 minutos, tal como se propone en Molina-Pariente et al. (2015). Esta amplitud refleja la diversidad en los tiempos quirúrgicos según el tipo de intervención y su complejidad.
- **Desviación típica de la duración de la intervención (σ_p).** A cada operación se le asocia también una medida de dispersión que representa la incertidumbre en la duración prevista. Esta desviación se estima como un porcentaje aleatorio de la media seleccionada, con valores comprendidos entre el 10 % y el 50 % de la duración.

Además de las variables comunes a todos los modelos, en el segundo y tercer modelo se incorporan parámetros auxiliares adicionales para mejorar el realismo de la planificación. En concreto, se introduce la compatibilidad intervención–quirófano en el modelo 2 y la disponibilidad de los cirujanos en el modelo 3, lo que permite simular restricciones técnicas y organizativas propias del entorno hospitalario.

- **Compatibilidad intervención–quirófano.** Corresponde a un parámetro binario que indica si una determinada operación puede ser realizada en un quirófano concreto un día dado. Además, se tiene en cuenta que parte de los quirófanos presentan una especialización técnica que los hace adecuados únicamente para determinados tipos de intervenciones. Esta proporción se fija en un **30 %** (Nieto Medina, 2021).

- **Disponibilidad de los cirujanos.** Cada cirujano tendrá una disponibilidad diaria que se representa mediante un conjunto de días en los que puede intervenir. Esta disponibilidad se ha generado aleatoriamente para el conjunto de días en el que se realiza la programación.

Capítulo 7: Resultados

7.1	Introducción.....	81
7.2	Explicación de los escenarios a analizar.....	81
7.3	Definición de indicadores de rendimiento.....	83
7.4	Comparativa general de modelos	85
7.5	Análisis de la influencia del número de quirófanos	86
7.6	Análisis de la influencia del número de días	89
7.7	Comparativa de modelos con baja saturación	91
7.8	Análisis de la influencia del tiempo de ejecución	92
7.9	Análisis del modelo 4 con distintos niveles de confianza	95
7.10	Análisis de la influencia del tiempo de rotación.....	97
7.11	Análisis de la influencia de la incertidumbre en la duración de las intervenciones	100
7.12	Análisis de la influencia de la saturación	103
7.13	Análisis de la influencia de la duración media de las intervenciones	106

7.1 Introducción

En este capítulo se recogen los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas con los modelos de programación quirúrgica desarrollados. El objetivo principal es analizar su comportamiento bajo distintos escenarios, utilizando datos sintéticos generados previamente y midiendo una serie de indicadores de rendimiento definidos conforme a estándares del sistema sanitario español.

A lo largo del capítulo, se muestra el desempeño de los distintos modelos mediante una simulación base, y se observa el impacto de diversas variables en la calidad de la programación quirúrgica, tales como el número de quirófanos disponibles, el horizonte temporal de planificación, el tiempo de ejecución del algoritmo, la duración del tiempo de limpieza, el nivel de incertidumbre en la duración de las intervenciones, etc.

7.2 Explicación de los escenarios a analizar

Con el objetivo de evaluar el comportamiento y la eficacia de los modelos desarrollados, se ha diseñado un conjunto de escenarios que permiten analizar el impacto de distintas variables sobre la calidad de la programación quirúrgica. Las simulaciones se han planteado de forma sistemática, replicando cada configuración 100 veces y calculando los valores medios para garantizar la robustez de los resultados. A continuación, se describen los escenarios analizados y el propósito específico de cada uno de ellos.

- **Comparación general entre modelos.** Se realiza una primera simulación básica con todos los modelos bajo las mismas condiciones: demanda del 200 % (es decir, una lista de espera equivalente al doble de la capacidad disponible), 6 quirófanos y un horizonte temporal de 10 días. Este escenario sirve como punto de partida para analizar el comportamiento general de los modelos y comparar su rendimiento bajo una situación de alta presión asistencial. En este caso, se comentan también los pormenores del funcionamiento de cada modelo.
- **Influencia del número de quirófanos disponibles.** Se analizan tres configuraciones distintas con 2, 4 y 6 quirófanos respectivamente, manteniendo constante el resto de parámetros (demanda del 200 % y 5 días de planificación). Esto permite estudiar cómo afecta la disponibilidad de quirófanos a los distintos indicadores de rendimiento del bloque quirúrgico.
- **Influencia del horizonte temporal de planificación.** En este caso se estudia la sensibilidad del modelo respecto al número de días disponibles para programar las intervenciones. Se analizan tres escenarios (1, 3 y 5 días), manteniendo una

demanda del 200 % y 6 quirófanos. Este análisis permite valorar si ampliar el horizonte temporal mejora significativamente la eficiencia de la programación quirúrgica.

- **Comparación en escenarios de baja saturación.** Se realiza una comparación entre todos los modelos con una demanda más baja (50 % respecto a la capacidad total), manteniendo 6 quirófanos y 5 días. Este análisis permite comprobar si el modelo 1, diseñado para minimizar el número de quirófanos utilizados, ofrece ventajas reales en contextos con menor presión asistencial, y cómo se comporta respecto al resto de modelos.
- **Influencia del tiempo de ejecución del algoritmo.** En este conjunto de simulaciones se evalúa el impacto del tiempo máximo de ejecución permitido al *solver*. Se fijan 4 niveles: 1, 3, 6 y 10 minutos. Para cada configuración se realizan 100 simulaciones por modelo, manteniendo la demanda al 200 %, 6 quirófanos y 5 días. El objetivo es determinar si un mayor tiempo de ejecución se traduce en mejoras significativas en los resultados obtenidos o si existe un punto en el que el rendimiento ya no mejora significativamente.
- **Evaluación del modelo 4 para distintos niveles de confianza.** El modelo 4 introduce una restricción de robustez estocástica que limita la probabilidad de que una jornada quirúrgica se extienda más allá del horario planificado. Para analizar su comportamiento, se simulan distintos niveles de confianza (99 %, 95 %, 90 %, 85 %, 80 %, 75 %, 70 %, 65 %, 60 % y 55 %), lo que permite explorar el equilibrio entre seguridad (evitar sobreutilización) y rendimiento (maximizar ocupación), buscando un nivel de confianza óptimo.
- **Influencia del tiempo de rotación entre intervenciones.** Se estudia cómo afecta el tiempo de rotación al rendimiento del sistema. Se simulan cinco valores distintos (10, 15, 20, 25 y 30 minutos) manteniendo constantes los valores de demanda, días y quirófanos. Este análisis es importante para entender el impacto de estas tareas sobre el rendimiento del bloque quirúrgico.
- **Análisis de la influencia de la incertidumbre en la duración de las intervenciones.** Este análisis se centra en evaluar cómo varía el desempeño de los modelos ante distintos niveles de incertidumbre (es decir, varianza) en la duración de las cirugías. El objetivo es comprobar si un mayor grado de variabilidad en los tiempos quirúrgicos afecta significativamente a la eficacia del plan y al cumplimiento de los horarios. Para ello, se realizan simulaciones en las que la desviación estándar de la duración se ajusta a diferentes niveles respecto a su valor medio: un 10 %, 20 %, 30 %, 40 % y 50 %.

- **Análisis de la influencia de la saturación.** En este análisis se consideran cuatro niveles distintos de saturación de la demanda, expresados como porcentajes respecto a la capacidad total disponible: 125 %, 175 %, 225 % y 275 %. Esto permite estudiar la capacidad de respuesta de cada modelo ante distintos niveles de sobrecarga, observando su comportamiento tanto en escenarios moderadamente exigentes como en situaciones de elevada presión operativa.
- **Análisis de la influencia de la duración media de las intervenciones.** En este escenario se plantean tres configuraciones diferentes en la generación de los datos sintéticos: un primer caso con duraciones distribuidas uniformemente entre 30 y 90 minutos (procedimientos breves), un segundo caso entre 60 y 180 minutos (procedimientos intermedios) y un tercero entre 90 y 240 minutos (procedimientos largos). Este análisis permite comprobar si el comportamiento de los modelos se ve afectado por la naturaleza más o menos compleja de las operaciones.

7.3 Definición de indicadores de rendimiento

Para poder analizar el comportamiento de los modelos propuestos y evaluar la calidad de las soluciones generadas, es necesario establecer un conjunto de indicadores que permitan medir su rendimiento. Estos indicadores servirán tanto para comparar objetivamente el desempeño entre diferentes modelos como para valorar el impacto que tienen ciertos parámetros (como el número de quirófanos, el horizonte temporal o el nivel de incertidumbre) sobre la programación quirúrgica. Además, el cálculo de estos indicadores se ha realizado siguiendo las definiciones y recomendaciones metodológicas establecidas en el informe *Eficiencia en la utilización de bloques quirúrgicos. Definición de indicadores*, publicado en 2011 por el Ministerio de Ciencia e Innovación y el Ministerio de Sanidad, Política Social e Igualdad, lo que garantiza su coherencia con los estándares del sistema sanitario español (Serra Sutton, et al., 2011). A continuación, se describen los distintos indicadores calculados durante las simulaciones, junto con las unidades en las que se expresan.

- **Número total de intervenciones realizadas.** Este indicador refleja cuántas intervenciones han sido finalmente programadas dentro del horizonte temporal disponible. Permite evaluar la capacidad del modelo para maximizar la actividad quirúrgica y dar respuesta a la demanda asistencial. Se mide en número de intervenciones.
- **Número medio de intervenciones por quirófano.** Mide la carga promedio de trabajo asignada a cada quirófano a lo largo de todo el horizonte temporal. Se expresa como número de intervenciones por quirófano.

- **Eficiencia neta agendada.** Representa el porcentaje del tiempo agendado en quirófano que se ha destinado exclusivamente a cirugía, según las duraciones estimadas durante la programación. Este indicador mide la proporción del tiempo que ha sido utilizado con un propósito clínico directo, sin contar rotaciones ni pausas. Se expresa en porcentaje (%).
- **Eficiencia neta real.** Similar al anterior, pero calculado a partir de las duraciones reales de las intervenciones. Este valor permite comprobar si la planificación fue realista y eficaz, y hasta qué punto se cumplió lo previsto. Se expresa en porcentaje (%).
- **Eficiencia bruta agendada.** Indica el porcentaje del tiempo total disponible en quirófano que se ha programado, incluyendo tanto los tiempos de intervención como los periodos de rotación entre pacientes (limpieza, preparación, etc.) y considerando los tiempos estimados para cada intervención. Se mide en porcentaje (%).
- **Eficiencia bruta real.** Indica el porcentaje del tiempo total disponible en quirófano que se ha programado, incluyendo tanto los tiempos de intervención como los periodos de rotación entre pacientes (limpieza, preparación, etc.) y considerando las duraciones reales para cada intervención. Se mide en porcentaje (%).
- **Tiempo medio de uso por quirófano.** Corresponde al tiempo promedio que cada quirófano ha estado en uso efectivo (operando) durante la jornada, considerando únicamente la duración real de las cirugías. Se expresa en minutos.
- **Tiempo medio agendado por quirófano.** Representa el tiempo medio que ha sido reservado para intervenciones en cada quirófano, según la programación inicial. Sirve como referencia para comparar con el tiempo real de uso y detectar posibles desviaciones. Se mide en minutos.
- **Duración media real de las intervenciones.** Muestra el promedio de la duración de todas las cirugías realizadas. Se expresa en minutos.
- **Duración media agendada de las intervenciones.** Indica la media del tiempo reservado para cada intervención en el momento de la programación. Compararlo con la duración real permite analizar la precisión de las estimaciones. Se mide en minutos.
- **Porcentaje de sesiones con sobreutilización.** Este indicador señala la proporción de jornadas quirúrgicas (entendidas como el conjunto de intervenciones

programadas en un quirófano durante un día) en las que se ha superado el horario previsto. Se expresa como porcentaje sobre el total de sesiones.

- **Tiempo medio de sobreutilización.** Calcula, en aquellas sesiones donde ha habido sobreutilización, cuántos minutos adicionales se ha mantenido activo el quirófano respecto a su capacidad disponible. Se mide en minutos.
- **Tiempo medio sin uso.** Indica el tiempo promedio que los quirófanos han permanecido inactivos durante la jornada, una vez descontados los tiempos de intervención y limpieza. Es un reflejo de la ineficiencia en la utilización del recurso. Se expresa en minutos.
- **Número de quirófanos utilizados.** Representa cuántos quirófanos han sido empleados para realizar al menos una intervención durante el periodo de programación. Es especialmente útil para evaluar modelos diseñados para minimizar la utilización de recursos y ahorrar costes. Se mide en número de quirófanos.

7.4 Comparativa general de modelos

Para analizar el comportamiento global de los modelos desarrollados y comparar su rendimiento en condiciones homogéneas, se ha diseñado una simulación base que sirve como referencia para el resto de análisis. Se ha fijado una configuración común que representa una situación de alta presión asistencial, con una demanda quirúrgica equivalente al 200 % de la capacidad disponible, 6 quirófanos operativos y un horizonte temporal de 10 días para realizar la programación. El modelo 4, por su parte, se ha configurado inicialmente con un nivel de confianza del 95 %. Además, se ha limitado el tiempo máximo de ejecución del algoritmo a 1 minuto por modelo y simulación.

En este experimento se generan 100 conjuntos de datos sintéticos independientes, simulando 100 escenarios quirúrgicos. Para cada uno de estos escenarios, se aplica cada uno de los modelos propuestos, obteniendo sus correspondientes métricas de rendimiento. A partir de los resultados obtenidos en cada una de las simulaciones, se calcula la media de los valores de los indicadores de rendimiento, con el fin de obtener una medida robusta y representativa del desempeño de cada modelo.

Los valores utilizados para esta simulación general se detallan en la Tabla 11.

Porcentaje de demanda	200 %
Número de quirófanos disponibles	6
Horizonte temporal de planificación	10 días
Tiempo máximo de ejecución por modelo	1 min

Tabla 11: Parámetros utilizados para la simulación general.

Los resultados obtenidos tras esta simulación se recogen en la Tabla 12, donde se muestran los valores medios de los principales indicadores de rendimiento para cada uno de los modelos desarrollados.

	Modelo base	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
Eficiencia bruta agendada	98.01 %	98.00 %	97.61 %	96.62 %	70.14 %	99.65 %
Eficiencia bruta real	97.85 %	97.72 %	97.40 %	96.40 %	70.25 %	99.39 %
Eficiencia neta agendada	86.73 %	86.52 %	86.17 %	85.58 %	61.25 %	92.06 %
Eficiencia neta real	86.36 %	86.26 %	85.95 %	85.34 %	61.36 %	91.79 %
Nº de intervenciones	222.15	222.15	219.60	213.74	171.81	146.40
Nº de intervenciones por quirófano	3.70	3.70	3.66	3.55	2.85	2.44
Duración media agendada intervenciones [min]	112.63	112.62	113.03	116.55	103.43	182.15
Duración media real intervenciones [min]	112.37	112.37	112.76	116.24	103.63	181.57
Tiempo medio agendado por quirófano [min]	415.03	414.89	413.38	410.60	293.93	441.80
Tiempo medio de uso por quirófano [min]	414.06	413.67	412.42	409.67	294.47	440.55
Porcentaje de sesiones con sobreuso	39.23 %	39.18 %	37.35 %	35.70 %	1.20 %	42.35 %
Tiempo medio de sobreuso [min]	61.25	59.01	60.31	62.10	18.25	78.55
Tiempo medio sin uso [min]	34.29	34.29	35.17	39.59	143.53	36.30
Nº de quirófanos usados	6	6	6	6	6	6

Tabla 12: Resultados medios obtenidos para cada modelo en la simulación general (200 % de demanda, 6 quirófanos, 10 días, 1 min de ejecución).

7.5 Análisis de la influencia del número de quirófanos

Para estudiar cómo influye la disponibilidad de quirófanos en el rendimiento de los modelos desarrollados, se ha diseñado un experimento en el que se varía el número de quirófanos disponibles, manteniendo constantes el resto de parámetros. Esta simulación permite observar el impacto directo de este recurso sobre la capacidad de los modelos para realizar una programación eficiente del bloque quirúrgico.

En concreto, se analizan tres configuraciones distintas con 2, 4 y 6 quirófanos respectivamente. En todos los casos, se mantiene una demanda quirúrgica elevada, equivalente al 200 % de la capacidad disponible, y un horizonte temporal de planificación de 5 días. Asimismo, se establece un tiempo máximo de ejecución del algoritmo de 1 minuto por modelo y por simulación.

Al igual que en el apartado anterior y en los siguientes, para garantizar la robustez estadística de los resultados, en cada una de las configuraciones se generan 100 conjuntos de datos sintéticos independientes. A cada conjunto se le aplica cada uno de los modelos propuestos, y se calculan sus métricas de rendimiento correspondientes para, a continuación, agregar los valores mediante medias.

Los valores utilizados para este análisis se detallan en la Tabla 13.

Porcentaje de demanda	200 %
Número de quirófanos disponibles	2, 4 y 6
Horizonte temporal de planificación	5 días
Tiempo máximo de ejecución por modelo	1 min

Tabla 13: Parámetros utilizados para el análisis de la influencia del número de quirófanos.

El objetivo de este análisis es comprobar si aumentar el número de quirófanos disponibles mejora los indicadores de eficiencia del bloque quirúrgico o incrementa el número de intervenciones realizadas por quirófano.

La Tabla 14 muestra los valores medios obtenidos para los distintos modelos al aplicar cada una de las tres configuraciones de quirófanos (2, 4 y 6), manteniendo constantes el resto de parámetros experimentales.

	Modelo base			Modelo 1			Modelo 2			Modelo 3			Modelo 4			Modelo 5		
N° de quirófanos usados	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6
Eficiencia bruta agendada	98.96 %	98.36 %	97.89 %	97.83 %	97.93 %	97.94 %	99.25 %	97.39 %	97.54 %	97.67 %	97.34 %	96.55 %	73.63 %	70.54 %	70.01 %	99.57 %	99.72 %	99.69 %
Eficiencia bruta real	100.1 %	97.57 %	98.00 %	98.31 %	97.49 %	98.39 %	100 %	96.74 %	98.34 %	98.81 %	96.79 %	96.41 %	73.73 %	71.30 %	70.51 %	98.23 %	97.41 %	101.4 %
Eficiencia neta agendada	87.25 %	86.51 %	86.17 %	86.12 %	86.09 %	86.22 %	87.70 %	85.62 %	85.91 %	86.55 %	85.98 %	85.33 %	64.83 %	61.64 %	61.13 %	91.80 %	91.91 %	91.98 %
Eficiencia neta real	88.31 %	85.71 %	86.28 %	86.60 %	85.64 %	86.66 %	88.48 %	84.97 %	86.71 %	87.68 %	85.43 %	85.18 %	64.92 %	62.40 %	61.63 %	90.46 %	89.60 %	93.70 %
N° de intervenciones	37.47	86.51	112.47	37.47	86.09	112.53	36.93	85.62	111.73	35.60	85.98	107.80	28.17	56.97	85.27	24.87	91.91	74.00
N° de intervenciones por quirófano	3.75	3.79	3.75	3.75	3.79	3.75	3.69	3.77	3.72	3.56	3.64	3.59	2.82	2.85	2.84	2.49	2.50	2.47
Duración media agendada intervenciones [min]	111.95	109.64	110.49	110.50	109.20	110.47	114.13	109.30	110.86	117.01	113.69	114.18	111.16	103.99	103.30	177.73	176.79	179.12
Duración media real intervenciones [min]	113.27	108.65	110.64	111.11	108.65	111.07	115.15	108.47	111.93	118.57	112.98	113.99	111.36	105.25	104.16	175.20	172.29	182.42
Tiempo medio agendado por quirófano [min]	418.82	415.25	413.64	413.36	413.22	413.84	420.98	411.00	412.34	415.43	412.69	409.56	311.17	295.87	293.42	440.63	441.16	441.50
Tiempo medio de uso por quirófano [min]	423.87	411.43	414.14	415.70	411.10	415.99	424.73	407.87	416.18	420.87	410.06	408.88	311.64	299.52	295.81	434.22	430.07	449.74
Porcentaje de sesiones con sobreuso	48.08 %	40.37 %	39.51 %	42.39 %	37.12 %	41.29 %	43.66 %	36.42 %	41.37 %	40.54 %	35.19 %	34.74 %	1.00 %	1.16 %	1.05 %	43.73 %	40.31 %	51.68 %
Tiempo medio de sobreuso [min]	52.89	46.24	55.60	51.49	45.98	56.99	58.08	56.99	62.23	58.18	52.77	64.02	3.70	8.48	9.40	76.52	68.66	72.84
Tiempo medio sin uso [min]	24.95	29.99	31.98	29.93	29.94	31.08	23.91	34.55	33.16	27.50	33.15	38.66	126.48	138.20	141.95	39.33	40.66	30.93

Tabla 14: Resultados medios obtenidos para cada modelo en el análisis de la influencia del número de quirofanos (200 % de demanda, 2, 4 y 6 quirófanos, 5 días, 1 min de ejecución).

7.6 Análisis de la influencia del número de días

En este apartado se analiza un experimento en el que se varía el horizonte temporal de la programación, manteniendo constantes el resto de parámetros. Esta simulación permite observar el impacto directo de este parámetro sobre la capacidad de los modelos para realizar una programación eficiente del bloque quirúrgico.

En concreto, se analizan tres configuraciones distintas con 1, 3 y 5 días de horizonte temporal. En todos los casos, se mantiene una demanda quirúrgica elevada, equivalente al 200 % de la capacidad disponible, y 6 quirófanos disponibles. Asimismo, se establece un tiempo máximo de ejecución del algoritmo de 1 minuto por modelo y por simulación.

Los valores utilizados para este análisis se detallan en la Tabla 15.

Porcentaje de demanda	200 %
Número de quirófanos disponibles	6
Horizonte temporal de planificación	1, 3 y 5 días
Tiempo máximo de ejecución por modelo	1 min

Tabla 15: Parámetros utilizados para el análisis de la influencia del horizonte temporal.

El objetivo de este análisis es comprobar si aumentar el horizonte temporal de la programación mejora los indicadores de eficiencia del bloque quirúrgico o incrementa el número de intervenciones realizadas por quirófano.

Los resultados obtenidos para cada modelo y cada configuración de días se presentan en la Tabla 16, que recoge las métricas medias correspondientes a los 100 escenarios generados por cada combinación.

	Modelo base			Modelo 1			Modelo 2			Modelo 3			Modelo 4			Modelo 5		
N° de días	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5
Eficiencia bruta agendada	98.41 %	97.97 %	97.89 %	96.36 %	97.81 %	97.94 %	94.74 %	97.57 %	97.54 %	90.30 %	95.98 %	96.55 %	72.46 %	71.00 %	70.13 %	99.49 %	99.62 %	99.69 %
Eficiencia bruta real	98.86 %	98.53 %	98.00 %	97.30 %	98.50 %	98.39 %	93.75 %	98.46 %	98.34 %	89.49 %	96.51 %	96.41 %	72.31 %	70.86 %	70.34 %	97.55 %	102.1 %	101.4 %
Eficiencia neta agendada	87.26 %	86.51 %	86.17 %	85.21 %	86.36 %	86.22 %	84.33 %	86.17 %	85.91 %	81.63 %	85.42 %	85.33 %	63.94 %	62.18 %	61.22 %	91.78 %	92.07 %	91.98 %
Eficiencia neta real	87.72 %	87.07 %	86.28 %	86.15 %	87.05 %	86.66 %	83.34 %	87.06 %	86.71 %	80.82 %	85.95 %	85.18 %	63.78 %	62.04 %	61.43 %	89.84 %	94.56 %	93.70 %
N° de intervenciones	21.40	66.00	112.47	21.40	65.95	112.53	20.00	65.65	111.73	16.65	60.80	107.80	16.37	50.80	85.57	14.80	43.50	74.00
N° de intervenciones por quirófano	3.57	3.67	3.75	3.57	3.66	3.75	3.33	3.65	3.72	2.77	3.38	3.59	2.73	2.82	2.85	2.47	2.42	2.47
Duración media agendada intervenciones [min]	117.83	113.42	110.49	115.02	113.31	110.47	121.92	113.59	110.86	142.51	121.70	114.18	113.26	106.16	103.16	179.33	183.41	179.12
Duración media real intervenciones [min]	118.48	114.13	110.64	116.47	114.21	111.07	120.62	114.74	111.93	141.25	122.43	113.99	112.88	105.90	103.50	175.69	188.44	182.42
Tiempo medio agendado por quirófano [min]	418.87	415.24	413.64	409.01	414.52	413.84	404.76	413.64	412.34	391.81	410.01	409.56	306.89	298.46	293.86	440.53	441.94	441.50
Tiempo medio de uso por quirófano [min]	421.04	417.93	414.14	413.54	417.86	415.99	400.02	417.88	416.18	387.94	412.58	408.88	306.16	297.80	294.84	431.26	453.87	449.74
Porcentaje de sesiones con sobreuso	45.50 %	40.87 %	39.17 %	41.23 %	39.71 %	41.67 %	25.19 %	40.43 %	41.29 %	26.53 %	37.57 %	34.84 %	0.57 %	1.00 %	1.16 %	41.65 %	46.31 %	51.73 %
Tiempo medio de sobreuso [min]	53.65	67.37	55.60	51.70	67.12	56.99	46.68	69.41	62.23	46.11	69.14	64.02	1.00	8.27	12.98	62.81	91.61	72.84
Tiempo medio sin uso [min]	29.97	32.75	31.98	36.59	33.22	31.08	44.09	34.24	33.16	66.61	39.40	38.66	133.09	140.33	142.87	36.20	31.73	30.93
N° de quirófanos usados	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

Tabla 16: Resultados medios obtenidos para cada modelo en el análisis de la influencia del horizonte temporal (200 % de demanda, 6 quirófanos, 1, 3 y 5 días, 1 min de ejecución).

7.7 Comparativa de modelos con baja saturación

En este apartado se analiza un escenario diseñado para evaluar el comportamiento de los modelos propuestos en contextos de baja saturación del bloque quirúrgico. Este tipo de escenarios resulta especialmente interesante para valorar si los modelos son capaces de ajustar la asignación de recursos cuando la demanda no presiona al sistema, lo que puede implicar nuevas prioridades, como la minimización del uso innecesario de recursos.

Concretamente, se realiza una comparación entre todos los modelos aplicados sobre un conjunto de simulaciones donde la demanda quirúrgica es del 50 % respecto a la capacidad total disponible. Se mantiene constante la disponibilidad de 6 quirófanos y un horizonte temporal de 5 días, así como un tiempo máximo de ejecución de 1 minuto por modelo y simulación.

Los valores utilizados para esta simulación se detallan en la Tabla 17.

Porcentaje de demanda	50 %
Número de quirófanos disponibles	6
Horizonte temporal de planificación	5 días
Tiempo máximo de ejecución por modelo	1 min

Tabla 17: Parámetros utilizados para la simulación con sobreoferta.

A continuación, se presentan los resultados medios obtenidos para cada uno de los modelos en este escenario de baja presión asistencial, en el que la demanda quirúrgica representa solo el 50 % de la capacidad disponible. La Tabla 18 recoge los valores de los indicadores de rendimiento.

	Modelo base	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
Eficiencia bruta agendada	55.63 %	55.63 %	55.57 %	50.17 %	55.56 %	55.63 %
Eficiencia bruta real	55.92 %	55.92 %	55.88 %	50.43 %	55.85 %	55.92 %
Eficiencia neta agendada	50.58 %	50.58 %	50.52 %	45.59 %	50.51 %	50.58 %
Eficiencia neta real	50.87 %	50.87 %	50.83 %	45.85 %	50.80 %	50.87 %
Nº de intervenciones	48.52	48.52	48.46	43.92	48.46	48.52
Nº de intervenciones por quirófano	1.62	1.62	1.62	1.46	1.62	1.62
Duración media agendada intervenciones [min]	150.44	150.44	150.47	149.80	150.42	150.44
Duración media real intervenciones [min]	151.35	151.35	151.44	150.74	151.33	151.35
Tiempo medio agendado por quirófano [min]	297.35	419.79	280.51	276.52	245.79	297.47
Tiempo medio de uso por quirófano [min]	298.98	422.27	282.25	278.2	247.20	299.17
Porcentaje de sesiones con sobreuso	12.26 %	37.53 %	10.96 %	10.78 %	1.17 %	11.35 %
Tiempo medio de sobreuso [min]	74.54	75.04	69.67	69.66	24.26	72.51
Tiempo medio sin uso [min]	267.75	393.01	252.14	309.48	215.80	267.63
Nº de quirófanos usados	4.91	3.47	5.20	4.76	5.92	4.91

Tabla 18: Resultados medios obtenidos para cada modelo con sobreoferta (50 % de demanda, 6 quirófanos, 5 días, 1 min de ejecución).

7.8 Análisis de la influencia del tiempo de ejecución

En este apartado se analiza el impacto que tiene el tiempo máximo de ejecución asignado al *solver* en la calidad de las soluciones obtenidas por los distintos modelos. Dado que se trata de un problema de optimización complejo, con un espacio de soluciones extremadamente amplio, el algoritmo puede tardar un tiempo indefinido en alcanzar la solución óptima. Por ello, el *solver* no busca necesariamente una solución perfecta, sino la mejor que pueda encontrar dentro de un límite de tiempo. De este modo, el parámetro de tiempo máximo de ejecución actúa como una restricción práctica que permite obtener soluciones en un plazo razonable, lo cual es especialmente importante si se desea integrar la herramienta en la operativa diaria de un hospital. Este análisis resulta, por tanto, fundamental para determinar si ampliar el tiempo de búsqueda mejora significativamente los resultados, o si la mejora de rendimiento obtenida no justifica aumentar dicho tiempo de ejecución.

Para ello, se han definido cuatro configuraciones con distintos límites de tiempo de ejecución: 1, 3, 6 y 10 minutos. En cada uno de estos escenarios, se han realizado 100 simulaciones, manteniendo constante el resto de parámetros experimentales: una demanda quirúrgica del 200 %, un total de 6 quirófanos disponibles y un horizonte temporal de 5 días.

El objetivo de este análisis es evaluar el balance entre calidad de la solución y coste computacional, permitiendo identificar un umbral de tiempo eficiente que maximice el rendimiento del modelo sin incurrir en gastos innecesarios de tiempo o recursos de cálculo.

Los valores utilizados para esta simulación se recogen en la Tabla 19.

Porcentaje de demanda	200 %
Número de quirófanos disponibles	6
Horizonte temporal de planificación	5 días
Tiempo máximo de ejecución	1, 3, 6 y 10 min

Tabla 19: Parámetros utilizados para el análisis de la influencia del tiempo de ejecución.

A continuación, en las Tabla 20 y Tabla 21 se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas para cada uno de los modelos, utilizando distintos tiempos máximos de ejecución para cada simulación.

	Modelo base				Modelo 1				Modelo 2			
Tiempo de ejecución [min]	1	3	6	10	1	3	6	10	1	3	6	10
Eficiencia bruta agendada	97.98 %	98.22 %	98.21 %	98.24 %	97.95 %	98.12 %	98.12 %	98.05 %	97.55 %	97.70 %	97.80 %	97.83 %
Eficiencia bruta real	97.78 %	98.98 %	98.14 %	98.87 %	97.69 %	98.93 %	98.76 %	98.07 %	97.34 %	98.33 %	98.42 %	97.73 %
Eficiencia neta agendada	86.45 %	86.65 %	86.55 %	86.56 %	86.42 %	86.55 %	86.47 %	86.44 %	86.10 %	86.21 %	86.22 %	86.19 %
Eficiencia neta real	86.25 %	87.41 %	87.21 %	86.53 %	86.16 %	87.37 %	87.11 %	86.47 %	85.89 %	86.83 %	86.84 %	86.19 %
Nº de intervenciones	110.68	111.10	111.87	111.91	110.68	111.07	111.83	111.88	109.88	110.33	111.17	111.04
Nº de intervenciones por quirófano	3.69	3.70	3.73	3.73	3.69	3.70	3.73	3.73	3.66	3.68	3.71	3.70
Duración media agendada intervenciones [min]	112.63	112.41	111.54	111.92	112.62	112.32	111.46	111.86	113	112.62	111.80	112.13
Duración media real intervenciones [min]	112.36	113.41	112.41	111.91	112.36	113.39	112.32	111.93	112.72	113.46	112.62	112.16
Tiempo medio agendado por quirófano [min]	414.98	415.92	415.46	415.50	414.83	415.43	415.05	414.92	413.3	413.78	413.86	413.70
Tiempo medio de uso por quirófano [min]	414.03	419.56	418.62	415.33	413.56	419.35	418.15	415.03	412.28	416.79	416.84	413.70
Porcentaje de sesiones con sobreuso	39.13 %	41.32 %	42.63 %	42.27 %	39.08 %	42.11 %	43.17 %	41.37 %	37.39 %	41.98 %	39.85 %	39.11 %
Tiempo medio de sobreuso [min]	61.15	63.87	57.96	56.10	58.91	63.46	58.49	59.69	60.23	55.89	63.47	59.04
Tiempo medio sin uso [min]	34.26	31.05	30.05	33.05	34.26	31.55	31.18	33.92	35.15	31.98	32.89	34.35
Nº de quirófanos usados	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

Tabla 20: Resultados medios obtenidos para cada modelo en el análisis del tiempo de ejecución (200 % de demanda, 6 quirófanos, 5 días, 1, 3, 6 y 10 min de ejecución) (parte I).

	Modelo 3				Modelo 4				Modelo 5			
Tiempo de ejecución [min]	1	3	6	10	1	3	6	10	1	3	6	10
Eficiencia bruta agendada	96.57 %	96.96 %	96.78 %	97.01 %	70.27 %	70.56 %	70.38 %	70.34 %	99.63 %	99.70 %	99.71 %	99.76 %
Eficiencia bruta real	96.37 %	97.57 %	96.99 %	96.77 %	70.14 %	70.91 %	69.85 %	69.79 %	99.37 %	100.41 %	100.80 %	99.81 %
Eficiencia neta agendada	85.53 %	85.83 %	85.65 %	85.86 %	61.36 %	61.62 %	61.41 %	61.34 %	92.04 %	92.09 %	92.07 %	92.07 %
Eficiencia neta real	85.34 %	86.44 %	85.86 %	85.63 %	61.23 %	61.97 %	60.87 %	60.79 %	91.78 %	92.80 %	93.16 %	92.12 %
Nº de intervenciones	105.92	106.83	106.80	107.00	85.55	85.83	86.20	86.40	72.88	73.07	73.33	73.80
Nº de intervenciones por quirófano	3.53	3.56	3.56	3.57	2.85	2.86	2.87	2.88	2.43	2.44	2.44	2.46
Duración media agendada intervenciones [min]	116.5	115.80	115.65	115.69	103.40	103.44	102.70	102.35	182.14	181.70	181.04	180.10
Duración media real intervenciones [min]	116.21	116.65	115.95	115.42	103.17	104.03	101.78	101.44	181.56	183.12	183.19	180.19
Tiempo medio agendado por quirófano [min]	410.56	411.98	411.14	412.14	294.54	295.76	294.75	294.41	441.81	442.02	441.95	441.96
Tiempo medio de uso por quirófano [min]	409.63	414.92	412.15	411.02	293.89	297.47	292.18	291.77	440.53	445.42	447.16	442.19
Porcentaje de sesiones con sobreuso	35.72 %	38.13 %	38.71 %	36.19 %	1.15 %	1.06 %	1.21 %	1.11 %	42.33 %	44.22 %	46.24 %	47.14 %
Tiempo medio de sobreuso [min]	62.12	60.86	61.75	55.19	6.92	2.93	3.97	9.57	78.54	83.66	86.22	70.47
Tiempo medio sin uso [min]	39.55	35.24	37.42	36.02	143.62	139.76	144.75	145.35	36.29	35.05	35.54	34.01
Nº de quirófanos usados	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

Tabla 21: Resultados medios obtenidos para cada modelo en el análisis de la influencia del tiempo de ejecución (200 % de demanda, 6 quirófanos, 5 días, 1, 3, 6 y 10 min de ejecución) (parte 2).

7.9 Análisis del modelo 4 con distintos niveles de confianza

En este apartado se analiza el comportamiento específico del modelo 4, caracterizado por la incorporación de una restricción de robustez estocástica que busca limitar la probabilidad de que una sesión quirúrgica se extienda más allá del horario planificado. Esta característica permite tener en cuenta la incertidumbre asociada a la duración real de las intervenciones, introduciendo un control explícito sobre el riesgo de sobreutilización del bloque quirúrgico.

Para evaluar el impacto de esta restricción, se han definido distintos niveles de confianza: 99 %, 95 %, 90 %, 85 %, 80 %, 75 %, 70 %, 65 %, 60 % y 55 %. Cada uno de estos valores representa el nivel mínimo permitido de probabilidad de que una sesión quirúrgica tenga una duración inferior a la capacidad disponible del quirófano. A mayor nivel de confianza (por ejemplo, 99 %), el modelo tiende a ser más conservador, generando planificaciones más seguras, pero también potencialmente menos eficientes. Por el contrario, niveles más bajos permiten asumir más riesgo, con el objetivo de mejorar la utilización de los recursos disponibles.

Este experimento permite observar cómo varía el equilibrio entre eficiencia y fiabilidad en la programación quirúrgica a medida que se ajusta el umbral de tolerancia al riesgo, lo que resulta de gran importancia para decidir un nivel de confianza adecuado según las prioridades del centro hospitalario.

Los valores utilizados para esta simulación se presentan en la Tabla 22.

Porcentaje de demanda	200 %
Número de quirófanos disponibles	6
Horizonte temporal de planificación	5 días
Tiempo máximo de ejecución por modelo	1 min
Nivel de confianza	99 %, 95 %, 90 %, 85 %, 80 %, 75 %, 70 %, 65 %, 60 % y 55 %

Tabla 22: Parámetros utilizados para el análisis de la influencia del nivel de confianza.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en el experimento realizado con el modelo 4 bajo distintos niveles de confianza, que van del 99 % al 55 %. La Tabla 23 recoge los valores medios de los indicadores de rendimiento calculados a partir de 100 simulaciones para cada nivel.

Modelo 4										
Nivel de confianza	99 %	95 %	90 %	85 %	80 %	75 %	70 %	65 %	60 %	55 %
Eficiencia bruta agendada	63.51 %	70.12 %	74.77 %	77.89 %	80.84 %	83.42 %	86.41 %	88.86 %	91.70 %	94.81 %
Eficiencia bruta real	63.33 %	70.24 %	74.63 %	78.31 %	81.26 %	82.80 %	87.69 %	89.51 %	91.49 %	95.17 %
Eficiencia neta agendada	55.26 %	61.23 %	65.40 %	68.11 %	70.79 %	73.14 %	75.94 %	78.13 %	80.76 %	83.40 %
Eficiencia neta real	55.07 %	61.35 %	65.26 %	68.54 %	71.21 %	72.52 %	77.23 %	78.78 %	80.55 %	83.76 %
Nº de intervenciones	79.27	85.37	89.97	93.87	96.5	98.70	100.50	103.05	105.03	109.57
Nº de intervenciones por quirófano	2.64	2.85	3.01	3.13	3.22	3.29	3.35	3.43	3.52	3.65
Duración media agendada intervenciones [min]	100.50	103.43	104.86	104.63	105.74	106.85	108.92	109.33	110.86	109.72
Duración media real intervenciones [min]	100.17	103.62	104.65	105.28	106.36	105.98	110.76	110.25	110.58	110.20
Tiempo medio agendado por quirófano [min]	265.24	293.92	313.90	326.94	339.81	351.07	364.51	375.03	387.66	400.31
Tiempo medio de uso por quirófano [min]	264.33	294.46	313.26	328.97	341.79	348.10	370.68	378.15	386.63	402.03
Porcentaje de sesiones con sobreuso	0.13 %	1.21 %	2.36 %	5.77 %	8.62 %	11.53 %	15.17 %	19.34 %	23.48 %	31.03 %
Tiempo medio de sobreuso [min]	4.07	18.27	12.83	29.51	29.56	40.77	46.87	50.47	52.38	60.26
Tiempo medio sin uso [min]	176.17	143.51	122.27	106.33	92.64	85.99	67.30	59.88	52.49	41.79
Nº de quirófanos usados	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

Tabla 23: Resultados medios obtenidos para el modelo 4 con distintos niveles de confianza (200 % de demanda, 6 quirófanos, 5 días, 1 min de ejecución).

7.10 Análisis de la influencia del tiempo de rotación

En este apartado se analiza cómo influye el tiempo de rotación entre intervenciones quirúrgicas, que representa el intervalo entre cirugías consecutivas necesario para acondicionar el quirófano y trasladar al paciente, sobre el comportamiento de la programación quirúrgica. Aunque esta tarea no forma parte directa de la actividad quirúrgica, su duración impacta directamente en la ocupación global del bloque quirúrgico.

Para estudiar esta influencia, se han definido cinco escenarios con tiempos de rotación de 10, 15, 20, 25 y 30 minutos. Cada uno de estos valores representa un nivel diferente de exigencia logística y organizativa. Reducciones en este tiempo pueden mejorar la eficiencia, pero también aumentar el riesgo de errores o comprometer los estándares de seguridad e higiene. Por el contrario, tiempos más amplios aseguran una mayor preparación del entorno quirúrgico, pero reducen la cantidad de tiempo disponible para intervenciones.

En todos los casos, se han realizado 100 simulaciones por configuración, manteniendo constantes el resto de los parámetros: una demanda quirúrgica del 200 %, 6 quirófanos disponibles, un horizonte temporal de 5 días y un tiempo máximo de ejecución del algoritmo de 1 minuto por modelo y simulación.

Los valores utilizados para esta simulación se presentan en la Tabla 24.

Porcentaje de demanda	200 %
Número de quirófanos disponibles	6
Horizonte temporal de planificación	5 días
Tiempo máximo de ejecución por modelo	1 min
Tiempo de rotación	10, 15, 20, 25 y 30 minutos

Tabla 24: Parámetros utilizados para el análisis de la influencia del tiempo de rotación.

A continuación, en las Tabla 25 y Tabla 26 se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas para cada uno de los modelos bajo distintos tiempos de rotación entre intervenciones.

	Modelo base					Modelo 1					Modelo 2				
Tiempo de rotación [min]	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30
Eficiencia bruta agendada	98.00 %	97.98 %	97.96 %	97.69 %	97.87 %	97.89 %	97.95 %	97.86 %	97.61 %	97.79 %	97.45 %	97.55 %	97.46 %	97.48 %	97.62 %
Eficiencia bruta real	97.89 %	97.78 %	98.21 %	97.54 %	97.34 %	97.77 %	97.69 %	98.08 %	97.55 %	96.99 %	97.68 %	97.34 %	97.77 %	97.27 %	97.12 %
Eficiencia neta agendada	90.01 %	86.45 %	82.91 %	79.55 %	76.52 %	89.90 %	86.42 %	82.81 %	79.49 %	76.47 %	89.52 %	86.10 %	82.51 %	79.44 %	76.39 %
Eficiencia neta real	89.89 %	86.25 %	83.16 %	79.41 %	75.99 %	89.78 %	86.16 %	83.04 %	79.43 %	75.67 %	89.75 %	85.89 %	82.83 %	79.23 %	75.89 %
N° de intervenciones	115.13	110.68	108.37	104.43	102.47	115.07	110.68	108.30	104.40	102.37	114.27	109.88	107.60	103.90	101.90
N° de intervenciones por quirófano	3.84	3.69	3.61	3.48	3.42	3.84	3.69	3.61	3.48	3.41	3.81	3.66	3.59	3.46	3.40
Duración media agendada intervenciones [min]	112.64	112.63	110.30	109.81	107.62	112.57	112.62	110.23	109.75	107.64	112.87	113	110.55	110.20	108.03
Duración media real intervenciones [min]	112.47	112.36	110.63	109.63	106.87	112.39	112.36	110.54	109.70	106.51	113.14	112.72	110.98	109.93	107.31
Tiempo medio agendado por quirófano [min]	432.03	414.98	397.98	381.86	367.29	431.53	414.83	397.50	381.53	367.03	429.67	413.3	396.07	381.30	366.07
Tiempo medio de uso por quirófano [min]	431.49	414,01	399.15	381.19	364.77	430.94	413.56	398.58	381.26	363.20	430.78	412.28	397.56	380.30	364.27
Porcentaje de sesiones con sobreuso	40.03 %	39.37 %	40.16 %	39.84 %	38.99 %	39.54 %	39.72 %	41.02 %	38.62 %	35.32 %	39.27 %	37.63 %	39.55 %	38.43 %	36.18 %
Tiempo medio de sobreuso [min]	61.84	61.15	58.63	58.34	52.88	64.05	58.91	55.37	56.31	53.57	62.70	60.23	60.45	54.20	57.41
Tiempo medio sin uso [min]	34.49	34.26	31.96	34.11	32.88	34.49	34.26	32.41	33.65	33.27	35.08	35.15	34.44	33.62	34.16
N° de quirófanos usados	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

Tabla 25: Resultados medios obtenidos para cada modelo en el análisis de la influencia del tiempo de rotación (200 % de demanda, 6 quirófanos, 5 días, 1 min de ejecución) (parte 1).

	Modelo 3					Modelo 4					Modelo 5				
Tiempo de rotación [min]	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30
Eficiencia bruta agendada	96.71 %	96.57 %	96.61 %	96.41 %	96.27 %	69.59 %	70.12 %	70.45 %	70.90 %	71.23 %	99.82 %	99.63 %	99.47 %	99.35 %	99.59 %
Eficiencia bruta real	97.11 %	96.37 %	96.80 %	96.37 %	95.76 %	69.72 %	70.24 %	70.46 %	70.34 %	71.18 %	100.2 %	99.37 %	99.18 %	99.03 %	101.1 %
Eficiencia neta agendada	89.09 %	85.53 %	82.16 %	79.07 %	75.92 %	63.48 %	61.23 %	58.89 %	56.98 %	54.76 %	94.35 %	92.04 %	90.03 %	88.60 %	87.04 %
Eficiencia neta real	89.49 %	85.34 %	82.35 %	79.03 %	75.41 %	63.60 %	61.35 %	58.90 %	56.42 %	54.71 %	94.69 %	91.78 %	89.73 %	88.27 %	88.51 %
Nº de intervenciones	109.70	105.92	104.07	99.87	97.70	88.10	85.37	83.23	80.20	79.07	78.77	72.88	68.00	61.93	60.23
Nº de intervenciones por quirófano	3.66	3.53	3.47 %	3.33	3.26	2.94	2.85	2.77	2.67	2.64	2.63	2.43	2.27	2.06	2.01
Duración media agendada intervenciones [min]	117.07	116.5	113.82	114.15	111.98	103.93	103.43	102.00	102.40	99.81	172.72	182.14	191.10	206.16	208.16
Duración media real intervenciones [min]	117.58	116.21	114.98	114.15	111.23	104.15	103.62	102.04	101.42	99.72	173.31	181.56	190.53	205.46	211.70
Tiempo medio agendado por quirófano [min]	427.65	410.56	394.36	379.54	364.40	304.69	293.92	282.68	273.49	262.84	452.88	441.81	432.14	425.27	417.90
Tiempo medio de uso por quirófano [min]	429.56	409.63	395.26	379.35	361.96	305.28	294.46	282.74	270.82	262.59	454.54	440.53	430.72	423.71	424.83
Porcentaje de sesiones con sobreuso	39.26 %	35.31 %	36.74 %	36.38 %	33.29%	1.09 %	1.21 %	1.17 %	1.19 %	1.23 %	46.45 %	42.17 %	42.57 %	44.09 %	46.17 %
Tiempo medio de sobreuso [min]	62.94	62.12	59.04	60.64	54.88	5.88	18.27	5.83	9.17	6.37	75.98	78.54	84.65	78.95	86.70
Tiempo medio sin uso [min]	38.68	39.55	36.36	39.10	38.51	145.63	143.51	142.09	141.14	138.57	34.28	36.29	39.98	39.36	35.35
Nº de quirófanos usados	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

Tabla 26: Resultados medios obtenidos para cada modelo en el análisis de la influencia del tiempo de rotación (200 % de demanda, 6 quirófanos, 5 días, 1 min de ejecución) (parte 2).

7.11 Análisis de la influencia de la incertidumbre en la duración de las intervenciones

En este apartado se analiza cómo afecta la incertidumbre asociada a la duración de las intervenciones quirúrgicas al rendimiento de los modelos de programación desarrollados. Esta incertidumbre se representa mediante la varianza o, de forma equivalente, mediante la desviación estándar respecto a la duración media estimada de cada intervención.

En entornos quirúrgicos reales, las duraciones de las operaciones pueden variar de forma significativa, incluso dentro de una misma categoría de intervención. Esta variabilidad introduce un componente de riesgo en la programación, que puede traducirse en retrasos, sobreutilización de recursos o tiempos muertos no previstos. Por tanto, es fundamental evaluar si los modelos analizados mantienen un rendimiento robusto bajo diferentes niveles de variabilidad o si esta incertidumbre degrada su comportamiento de forma notable.

Para ello, se han diseñado cinco escenarios distintos, en los que la desviación estándar de la duración de las intervenciones se fija como un porcentaje del valor medio, concretamente: 10 %, 20 %, 30 %, 40 % y 50 %. En cada configuración, se generan 100 simulaciones independientes por modelo, permitiendo calcular valores promedio estables para los indicadores de rendimiento. El resto de parámetros del experimento se mantienen constantes: demanda quirúrgica del 200 %, 6 quirófanos disponibles, horizonte temporal de planificación de 5 días y tiempo máximo de ejecución de 1 minuto por simulación.

Este análisis permite valorar el grado de sensibilidad de los modelos ante la incertidumbre quirúrgica y detectar si existen diferencias relevantes entre ellos en cuanto a su capacidad para adaptarse a escenarios con mayor variabilidad.

Los valores utilizados para esta simulación se presentan en la Tabla 27.

Porcentaje de demanda	200 %
Número de quirófanos disponibles	6
Horizonte temporal de planificación	5 días
Tiempo máximo de ejecución por modelo	1 min
Niveles de desviación estándar	10 %, 20 %, 30 %, 40 % y 50 % de la media

Tabla 27: *Parámetros utilizados para el análisis de la influencia de la incertidumbre en la duración de las intervenciones.*

A continuación, en las Tabla 28 y Tabla 29 se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas para cada uno de los modelos, bajo distintos niveles de incertidumbre en la duración real de las intervenciones quirúrgicas.

	Modelo base					Modelo 1					Modelo 2				
Desviación típica	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %
Eficiencia bruta agendada	97.98 %	97.81 %	98.06 %	97.93 %	97.93 %	97.82 %	97.87 %	97.83 %	97.81 %	97.89 %	97.49 %	97.44 %	97.47 %	97.40 %	97.64 %
Eficiencia bruta real	97.94 %	97.81 %	97.87 %	98.14 %	98.28 %	97.67 %	97.85 %	97.53 %	97.94 %	98.33 %	97.42 %	97.44 %	97.23 %	97.68 %	98.27 %
Eficiencia neta agendada	86.34 %	86.25 %	86.48 %	86.37 %	86.35 %	86.18 %	86.31 %	86.26 %	86.26 %	86.31 %	85.93 %	85.95 %	85.98 %	85.92 %	86.13 %
Eficiencia neta real	86.30 %	86.26 %	86.29 %	86.58 %	86.70 %	86.04 %	86.29 %	85.96 %	86.39 %	86.75 %	85.86 %	85.95 %	85.74 %	86.20 %	86.75 %
Nº de intervenciones	111.73	110.93	111.17	110.97	111.17	111.67	111.00	111.00	110.87	111.13	110.93	110.27	110.33	110.20	110.53
Nº de intervenciones por quirófano	3.72	3.70	3.71	3.70	3.71	3.72	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.68	3.68	3.67	3.68
Duración media agendada intervenciones [min]	111.39	112.08	112.13	112.15	111.97	111.25	112.10	112.02	112.11	111.96	111.67	112.37	112.32	112.34	112.33
Duración media real intervenciones [min]	111.35	112.10	111.89	112.42	112.36	111.07	112.07	111.64	112.28	112.50	111.57	112.37	112.02	112.69	113.10
Tiempo medio agendado por quirófano [min]	414.44	414.00	415.09	414.59	414.16	413.68	414.29	414.07	414.05	414.30	412.47	412.57	412.69	412.44	413.41
Tiempo medio de uso por quirófano [min]	414.24	414.03	414.20	415.58	416.14	413.01	414.17	412.62	414.68	416.41	412.13	412.58	411.56	413.77	416.42
Porcentaje de sesiones con sobreuso	33 %	38 %	41 %	43 %	42 %	31 %	36 %	38 %	41 %	43 %	29 %	35 %	39 %	41 %	44 %
Tiempo medio de sobreuso [min]	17.32	37.80	55.59	73.61	96.19	16.30	37.28	53.89	74.92	91.60	17.31	37.33	55.06	75.69	87.81
Tiempo medio sin uso [min]	15.59	24.98	33.20	39.88	49.22	16.18	24.01	32.82	40.41	48.11	17.44	25.27	34.81	42.00	47.09
Nº de quirófanos usados	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

Tabla 28: Resultados medios obtenidos para cada modelo en el análisis de la influencia de la incertidumbre en la duración de las intervenciones (200 % de demanda, 6 quirófanos, 5 días, 1 min de ejecución) (parte 1).

	Modelo 3					Modelo 4					Modelo 5				
Desviación típica	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %
Eficiencia bruta agendada	96.38 %	96.86 %	96.46 %	96.65 %	96.67 %	85.16 %	75.75 %	67.52 %	61.17 %	55.60 %	99.65 %	99.64 %	99.64 %	99.62 %	99.65 %
Eficiencia bruta real	96.29 %	96.70 %	96.15 %	97.18 %	97.74 %	84.92 %	75.85 %	67.34 %	60.60 %	55.63 %	99.35 %	99.83 %	99.97 %	100.6 %	98.77 %
Eficiencia neta agendada	85.33 %	85.81 %	85.39 %	85.59 %	85.60 %	74.79 %	66.26 %	58.77 %	53.04 %	48.10 %	92.05 %	92.16 %	92.03 %	92.07 %	92.05 %
Eficiencia neta real	85.25 %	85.65 %	85.07 %	86.12 %	86.66 %	74.55 %	66.36 %	58.59 %	52.47 %	48.13 %	91.74 %	92.35 %	92.37 %	93.07 %	91.17 %
Nº de intervenciones	106.07	106.07	106.30	106.20	106.30	99.53	91.10	84.03	78.03	72.07	73.03	71.83	73.03	72.43	72.97
Nº de intervenciones por quirófano	3.54	3.54	3.54	3.54	3.54	3.32	3.04	2.80	2.60	2.40	2.43	2.39	2.43	2.41	2.43
Duración media agendada intervenciones [min]	116.00	116.67	115.81	116.14	116.11	108.35	104.98	100.90	98.00	96.19	181.68	184.91	181.78	183.39	181.87
Duración media real intervenciones [min]	111.89	116.47	115.42	116.87	117.48	107.99	105.17	100.61	96.97	96.22	181.08	185.32	182.48	185.40	180.13
Tiempo medio agendado por quirófano [min]	409.58	411.90	409.87	410.83	410.88	359.02	318.06	282.09	254.58	230.87	441.82	442.37	441.76	441.94	441.82
Tiempo medio de uso por quirófano [min]	409.17	411.13	408.35	413.99	415.98	357.86	318.51	281.22	251.88	231.01	440.37	443.28	443.36	446.76	437.61
Porcentaje de sesiones con sobreuso	25 %	35 %	37 %	40 %	40 %	0.30 %	0.27 %	0.58 %	0.87 %	1.15 %	43 %	46 %	45 %	45 %	41 %
Tiempo medio de sobreuso [min]	17.16	32.52	52.31	75.61	98.00	0.87	0.93	4.57	9.95	16.18	23.44	51.26	76.73	107.07	122.65
Tiempo medio sin uso [min]	22.15	27.40	37.65	43.51	49.56	72.40	115.97	156.91	189.49	213.57	13.06	24.50	34.99	45.24	56.93
Nº de quirófanos usados	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

Tabla 29: Resultados medios obtenidos para cada modelo en el análisis de la influencia de la incertidumbre en la duración de las intervenciones (200 % de demanda, 6 quirófanos, 5 días, 1 min de ejecución) (parte 2).

7.12 Análisis de la influencia de la saturación

En este apartado se analiza el impacto que tiene el nivel de saturación de la demanda quirúrgica sobre la eficiencia de la agenda quirúrgica y el rendimiento de los modelos desarrollados. La saturación se refiere al porcentaje de demanda respecto a la capacidad total disponible en el bloque quirúrgico, y se va a variar su valor para evaluar la capacidad del sistema ante diferentes grados de presión asistencial.

Para estudiar esta influencia, se han definido cuatro escenarios con niveles de saturación del 125 %, 175 %, 225 % y 275 %. Estos valores permiten representar contextos que van desde una sobrecarga moderada hasta situaciones de alta presión, reflejando condiciones realistas que pueden encontrarse en distintos centros hospitalarios según su volumen y gestión.

En todos los casos, se han realizado 100 simulaciones por configuración, manteniéndose constantes el resto de los parámetros: 6 quirófanos disponibles, un horizonte temporal de 5 días y un tiempo máximo de ejecución del algoritmo de 1 minuto por modelo y simulación.

Los valores utilizados para esta simulación se presentan en la Tabla 30.

Porcentaje de demanda	125 %, 175 %, 225 % y 275 %
Número de quirófanos disponibles	6
Horizonte temporal de planificación	5 días
Tiempo máximo de ejecución por modelo	1 min

Tabla 30: Parámetros utilizados para el análisis de la influencia de la saturación.

A continuación, en las Tabla 31 y Tabla 32 se presentan los resultados medios obtenidos para cada uno de los modelos bajo distintos niveles de saturación de la demanda quirúrgica.

	Modelo base				Modelo 1				Modelo 2			
Porcentaje de demanda	125 %	175 %	225 %	275 %	125 %	175 %	225 %	275 %	125 %	175 %	225 %	275 %
Eficiencia bruta agendada	97.78 %	97.80 %	98.14 %	98.35 %	97.46 %	97.85 %	98.03 %	98.23 %	97.12 %	97.51 %	97.81 %	97.97 %
Eficiencia bruta real	97.97 %	96.83 %	98.20 %	98.48 %	97.40 %	96.73 %	97.97 %	98.41 %	97.25 %	96.35 %	97.90 %	98.06 %
Eficiencia neta agendada	87.76 %	86.67 %	86.20 %	85.66 %	87.45 %	86.72 %	86.10 %	85.55 %	87.18 %	86.45 %	85.94 %	85.06 %
Eficiencia neta real	87.95 %	85.70 %	86.26 %	85.79 %	87.36 %	85.59 %	86.04 %	85.73 %	87.31 %	85.29 %	86.03 %	85.46 %
N° de intervenciones	96.20	106.90	114.65	121.80	96.10	106.90	114.55	121.75	95.45	106.20	113.95	120.90
N° de intervenciones por quirófano	3.21	3.56	3.82	4.06	3.20	3.56	3.82	4.06	3.18	3.54	3.80	4.03
Duración media agendada intervenciones [min]	131.46	116.82	108.38	101.39	131.12	116.89	108.35	101.29	131.61	117.30	108.71	101.42
Duración media real intervenciones [min]	131.74	115.51	108.45	101.54	131.04	115.37	108.27	101.51	131.81	115.72	108.83	101.91
Tiempo medio agendado por quirófano [min]	421.26	415.99	413.77	411.19	419.76	416.25	413.29	410.62	418.45	414.95	412.50	408.27
Tiempo medio de uso por quirófano [min]	422.16	411.35	414.03	411.81	419.47	410.85	412.99	411.51	419.07	409.38	412.95	410.21
Porcentaje de sesiones con sobreuso	40.12 %	35.97 %	38.63 %	41.22 %	39.32 %	36.58 %	38.74 %	44.03 %	38.47 %	36.68 %	38.74 %	40.06 %
Tiempo medio de sobreuso [min]	65.21	62.55	61.32	55.68	63.63	59.88	61.70	50.52	64.04	58.09	61.93	55.48
Tiempo medio sin uso [min]	36.34	36.95	32.36	30.17	37.47	37.61	33.00	30.07	37.82	38.63	33.07	31.89
N° de quirófanos usados	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

Tabla 31: Resultados medios obtenidos para cada modelo en el análisis de la influencia del grado de saturación (6 quirófanos, 5 días, 1 min de ejecución) (parte 1).

	Modelo 3				Modelo 4				Modelo 5			
Porcentaje de demanda	125 %	175 %	225 %	275 %	125 %	175 %	225 %	275 %	125 %	175 %	225 %	275 %
Eficiencia bruta agendada	96.04 %	96.11 %	96.81 %	96.99 %	69.72 %	69.89 %	70.70 %	70.92 %	99.71 %	99.63 %	99.70 %	99.57 %
Eficiencia bruta real	95.96 %	94.96 %	96.70 %	97.41 %	69.75 %	69.78 %	70.71 %	70.94 %	100.3 %	100.8 %	100.56 %	99.76 %
Eficiencia neta agendada	86.51 %	85.42 %	85.37 %	84.54 %	61.97 %	61.26 %	61.52 %	61.17 %	91.36 %	91.83 %	92.21 %	92.56 %
Eficiencia neta real	86.43 %	84.27 %	85.26 %	85.22 %	61.99 %	61.15 %	61.53 %	61.20 %	91.98 %	93.05 %	93.07 %	92.75 %
N° de intervenciones	91.50	102.65	109.80	117.00	74.43	82.83	88.13	93.57	80.15	74.90	71.85	67.25
N° de intervenciones por quirófano	3.05	3.42	3.66	3.90	2.48	2.76	2.94	3.12	2.67	2.50	2.40	2.24
Duración media agendada intervenciones [min]	136.24	119.93	112.09	104.17	120.06	106.58	100.66	94.19	164.27	176.68	185.03	198.65
Duración media real intervenciones [min]	136.09	118.32	111.97	104.99	120.07	106.41	100.70	94.22	165.35	178.96	186.64	198.88
Tiempo medio agendado por quirófano [min]	415.24	410.01	409.79	405.78	297.45	294.04	295.32	293.62	438.53	440.78	442.63	444.29
Tiempo medio de uso por quirófano [min]	414.86	404.49	409.25	409.05	297.47	293.03	295.35	293.74	441.48	446.65	446.75	445.22
Porcentaje de sesiones con sobreuso	36.21 %	33.75 %	39.41 %	39.36 %	1.00 %	1.18 %	0.87 %	0.99 %	48.78 %	45.12 %	46.62 %	45.81 %
Tiempo medio de sobreuso [min]	66.76	58.49	54.04	56.53	16.53	17.10	4.17	9.43	72.50	79.86	84.35	81.57
Tiempo medio sin uso [min]	43.96	43.78	37.03	34.38	145.76	145.62	140.73	139.79	32.92	32.59	35.38	37.95
N° de quirófanos usados	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

Tabla 32: Resultados medios obtenidos para cada modelo en el análisis de la influencia del grado de saturación (6 quirófanos, 5 días, 1 min de ejecución) (parte 2).

7.13 Análisis de la influencia de la duración media de las intervenciones

En este apartado se evalúa cómo afecta la duración media esperada de las intervenciones quirúrgicas al rendimiento de la agenda quirúrgica y a la capacidad de programación de los modelos. La duración media de las cirugías está directamente relacionada con la complejidad de los procedimientos, y por tanto influye en la utilización del tiempo disponible y el número total de intervenciones que pueden programarse.

Para llevar a cabo este análisis, se han definido tres escenarios diferentes para la generación de datos sintéticos, modificando el intervalo de duración media de las intervenciones:

- **Primer escenario:** tiempos distribuidos uniformemente entre 30 y 90 minutos, representando procedimientos quirúrgicos breves.
- **Segundo escenario:** tiempos entre 60 y 180 minutos, correspondientes a intervenciones de complejidad media.
- **Tercer escenario:** tiempos entre 90 y 240 minutos, reflejando intervenciones de mayor duración y complejidad.

Este análisis permite valorar si los modelos se adaptan correctamente ante variaciones en la complejidad quirúrgica, y cómo se ve afectada la eficiencia operativa al aumentar el tiempo medio requerido por cada intervención.

En todos los casos, se han realizado 100 simulaciones por configuración, manteniéndose constantes los siguientes parámetros: una demanda quirúrgica del 200 %, 6 quirófanos disponibles, un horizonte temporal de 5 días y un tiempo máximo de ejecución del algoritmo de 1 minuto por modelo y simulación.

A continuación, en la **Tabla 33** se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas para cada uno de los modelos bajo los tres escenarios definidos de duración media de las intervenciones.

	Modelo base			Modelo 1			Modelo 2			Modelo 3			Modelo 4			Modelo 5		
Escenarios	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Eficiencia bruta agendada	99.15 %	98.45 %	97.99 %	99.13 %	98.31 %	97.64 %	98.66 %	97.90 %	97.49 %	98.59 %	97.28 %	96.51 %	75.18 %	71.16 %	68.78 %	99.89 %	99.99 %	99.63 %
Eficiencia bruta real	98.97 %	99.13 %	98.34 %	98.90 %	98.80 %	97.89 %	98.38 %	98.46 %	97.95 %	98.42 %	97.64 %	97.12 %	75.48 %	70.91 %	68.62 %	100.1 %	100.5 %	99.54 %
Eficiencia neta agendada	74.31 %	84.79 %	88.01 %	74.29 %	84.65 %	87.68 %	74.05 %	84.35 %	87.57 %	74.44 %	84.12 %	86.92 %	55.49 %	60.78 %	61.67 %	84.19 %	90.62 %	92.13 %
Eficiencia neta real	74.13 %	85.45 %	88.36 %	74.06 %	85.14 %	87.93 %	73.77 %	84.91 %	88.04 %	74.27 %	84.49 %	87.53 %	55.79 %	60.52 %	61.51 %	84.33 %	91.11 %	92.04 %
N° de intervenciones	238.48	131.28	95.80	238.48	131.25	95.58	236.26	130.12	95.18	231.92	126.26	92.04	189.00	99.70	68.27	150.72	90.00	72.00
N° de intervenciones por quirófano	7.95	4.38	3.19	7.95	4.37	3.19	7.88	4.34	3.17	7.73	4.21	3.07	6.30	3.32	2.28	5.02	3.00	2.40
Duración media agendada intervenciones [min]	44.88	93.03	132.36	44.87	92.96	132.17	45.14	93.38	132.56	46.23	95.99	136.08	42.29	87.82	130.24	80.44	144.99	184.60
Duración media real intervenciones [min]	44.77	93.78	132.89	44.73	93.51	132.56	44.97	94.02	133.27	46.13	96.43	137.07	42.52	87.46	129.89	80.57	145.77	184.46
Tiempo medio agendado por quirófano [min]	356.68	406.93	422.44	356.58	406.32	420.87	355.43	404.87	420.36	357.30	403.79	417.23	266.35	291.73	296.04	404.10	434.98	442.21
Tiempo medio de uso por quirófano [min]	355.83	410.17	424.11	355.57	408.67	422.07	354.09	407.56	422.59	356.48	405.56	420.16	267.80	290.51	295.26	404.78	437.31	441.81
Porcentaje de sesiones con sobreuso	42.01 %	42.78 %	40.31 %	43.03 %	42.79 %	40.63 %	39.42 %	40.37 %	39.57 %	40.71 %	38.49 %	39.13 %	0.11 %	0.42 %	0.70 %	46.32 %	47.64 %	45.81 %
Tiempo medio de sobreuso [min]	34.61	54.29	63.96	33.08	54.93	60.31	33.04	54.08	68.97	33.67	55.68	65.61	0.07	2.17	5.57	47.69	68.50	74.05
Tiempo medio sin uso [min]	19.35	27.22	33.76	19.50	28.73	34.72	20.02	29.32	35.56	21.10	32.65	39.61	117.70	139.71	150.79	21.90	30.32	35.45
N° de quirófanos usados	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

Tabla 33: Resultados medios obtenidos para cada modelo en el análisis de la influencia de la duración media de las intervenciones (200 % de demanda, 6 quirófanos, 5 días, 1 min de ejecución).

Capítulo 8: Discusión y limitaciones

8.1	Introducción.....	109
8.2	Discusión	109
8.2.1	Resultados propios.....	109
8.2.2	Comparativa con otros autores	125
8.3	Limitaciones	130

8.1 Introducción

En este TFG se ha desarrollado una herramienta de apoyo a la programación quirúrgica basada en técnicas de optimización, capaz de asignar de manera eficiente las intervenciones a quirófanos y días de operación teniendo en cuenta la disponibilidad de recursos y la incertidumbre inherente a la duración de las cirugías. En este capítulo se comentan los resultados obtenidos en el capítulo anterior, y se contrastan dichos resultados con las aportaciones de la literatura científica en este ámbito. Asimismo, se señalan las limitaciones detectadas en el proceso de diseño y validación de la herramienta.

8.2 Discusión

En este apartado se realiza la discusión derivada del trabajo desarrollado, organizada en dos secciones principales. En la primera se comentan e interpretan los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas, analizando las implicaciones que tienen para la organización quirúrgica. En la segunda se lleva a cabo una comparación de dichos resultados con los hallazgos de estudios previos recogidos en la literatura, lo que permite situar las aportaciones de este TFG en un marco más amplio de la investigación en programación quirúrgica.

8.2.1 Resultados propios

En este subapartado se comentan los resultados obtenidos en las simulaciones, analizando su significado y tendencias, así como las implicaciones prácticas que pueden tener en la organización quirúrgica.

8.2.1.1 Comparativa general de modelos

En la Tabla 12 se muestran los resultados obtenidos para la comparativa general, donde se pueden observar diferencias relevantes en el comportamiento de los modelos, en función de su diseño y del tipo de restricciones o criterios que incorporan.

El **modelo base** actúa como referencia, al no incluir restricciones específicas adicionales. Su comportamiento muestra valores elevados tanto en eficiencia bruta como neta (en torno al 98.01 % y 86.73 % respectivamente), así como el número máximo de intervenciones programadas (222.15), reflejando su capacidad para maximizar la ocupación del bloque quirúrgico sin considerar restricciones adicionales.

El **modelo 1**, diseñado para minimizar el número de quirófanos utilizados, muestra resultados prácticamente idénticos al modelo base, lo cual era esperable dado que en este escenario se parte de una situación en la que la demanda quirúrgica es muy superior a la capacidad disponible. La diferencia principal entre ambos modelos se verá de forma más evidente en contextos con menor demanda de intervenciones quirúrgicas.

El **modelo 2**, que introduce la restricción de compatibilidad entre intervenciones y quirófanos, presenta una ligera disminución en los indicadores de eficiencia bruta y neta (97.61% y 86.17% respectivamente) y en el número de intervenciones realizadas (219.60). Esta pequeña penalización refleja el impacto de limitar las combinaciones posibles entre operaciones y quirófanos.

El **modelo 3**, que incorpora restricciones relacionadas con la disponibilidad de los cirujanos, muestra una reducción algo más acusada en el número de intervenciones realizadas (213.74) y en la eficiencia bruta y neta (96.62% y 85.58% respectivamente).

El **modelo 4**, centrado en garantizar la robustez frente a la incertidumbre en la duración de las intervenciones a partir de restricciones estocásticas, reduce significativamente el nivel de actividad programada (171.81 intervenciones) y presenta valores notablemente inferiores de eficiencia (70.14 % bruta agendada, 61.25% neta agendada). Este comportamiento era previsible, ya que el modelo prioriza la fiabilidad y la contención del riesgo de sobreutilización, como lo demuestra su bajo porcentaje de sesiones con sobreuso (1.20 %) y el valor de tiempo medio de sobreuso (18.25 min). No obstante, este diseño también conlleva una mayor cantidad de tiempo sin uso (143.53 min), derivada de una planificación conservadora.

Por último, el **modelo 5**, que, en lugar de maximizar el número de intervenciones realizadas, busca maximizar la eficiencia operativa sin restricciones adicionales, logra los valores más altos de eficiencia bruta (99.65%) y neta (92.06 %), pero lo hace a costa de una programación muy ajustada que da lugar a una alta tasa de sobreuso (42.35 %) y a un elevado tiempo medio de sobreutilización (78.55 min). Además, realiza menos intervenciones (146.40) y de mayor duración (182.15 min), lo que contrasta con el modelo base, en el que se maximizan el número de intervenciones, donde se realizan de media 222.15 intervenciones con una duración media de 112.63 minutos y una eficiencia bruta del 98.01 %.

El número medio de intervenciones por quirófano sigue una tendencia similar a la observada en el número total de intervenciones, ya que ambos indicadores están estrechamente relacionados. Sin embargo, resulta destacable el caso del modelo 5, que presenta el valor más bajo en cuanto a intervenciones por quirófano (2.44), a pesar de ser el que alcanza los niveles más altos de eficiencia. Esto se debe a que, en este modelo, se prioriza la maximización del uso del tiempo disponible, incluso si ello implica realizar menos intervenciones, pero de mayor duración.

Por otro lado, cabe señalar que en todos los modelos analizados se ha hecho uso del total de quirófanos disponibles (6 en este escenario). Este comportamiento es coherente con el hecho de que se parte de una situación de alta presión asistencial, con

una demanda del 200 % respecto a la capacidad del sistema. En este contexto, cualquier modelo tiende naturalmente a utilizar todos los recursos disponibles para poder absorber la mayor carga de trabajo posible.

Si bien los resultados expuestos hasta el momento representan los valores medios obtenidos tras 100 simulaciones independientes por modelo, es importante considerar también la posible variabilidad de estos resultados. En contextos reales, la robustez de un modelo no solo se mide por su rendimiento promedio, sino también por su estabilidad ante diferentes configuraciones del entorno. Por ello, en la Figura 14 se representan gráficamente los valores individuales de eficiencia neta para las 100 simulaciones realizadas.

En dicha figura se muestra la variación de la eficiencia bruta agendada obtenida en cada una de las 100 simulaciones realizadas para cada uno de los modelos. Se observa que la mayoría de los modelos presentan un comportamiento bastante estable, especialmente el modelo 5, que mantiene una eficiencia elevada y prácticamente constante. El modelo 4 es el que muestra una eficiencia bruta agendada visiblemente más baja en todas las simulaciones, debido a su enfoque conservador orientado a evitar sobreutilizaciones. Además, este modelo presenta una mayor variabilidad respecto al resto, con diferencias apreciables entre simulaciones. Por el contrario, el modelo 5 no solo alcanza las mayores eficiencias, sino que también presenta la menor dispersión, lo que refleja una gran consistencia en sus resultados. En general, los modelos base, 1, 2 y 3 mantienen valores similares entre sí, aunque el modelo 3 muestra algunas oscilaciones más pronunciadas.

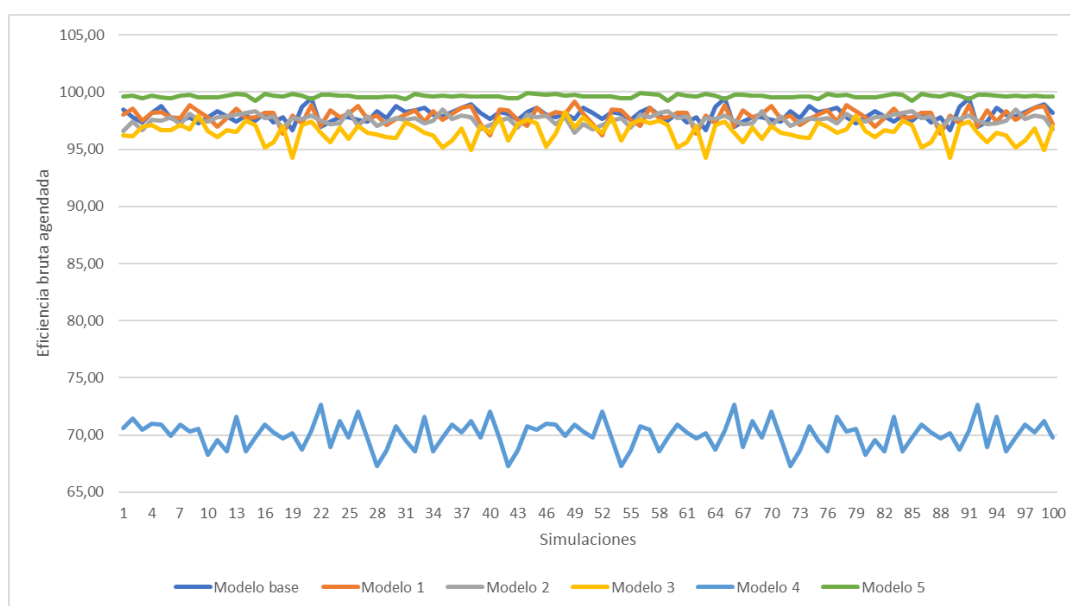


Figura 14: Evolución de la eficiencia bruta agendada en las 100 simulaciones por modelo.

En la Tabla 34, se muestran los valores de varianza y desviación típica de los anteriores datos, reforzando las conclusiones extraídas en el párrafo anterior. El modelo 4 presenta la varianza y la desviación típica más elevadas en cuanto a eficiencia bruta agendada, lo que confirma que su comportamiento es más sensible a las variaciones aleatorias en los datos de entrada. Esto se debe a las restricciones estocásticas, que lo hacen más dependiente de la incertidumbre en la duración de las intervenciones. En el extremo opuesto, el modelo 5 destaca por su excelente estabilidad, con la varianza más baja (0.0193) y una desviación típica de tan solo 0.1391. Los modelos base, 1, 2 y 3 presentan niveles intermedios de variabilidad, siendo el modelo 3 el que muestra una mayor dispersión dentro de este grupo.

Eficiencia bruta agendada						
	Modelo base	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
Desviación típica	0.5260	0.6151	0.4576	0.8170	1.3411	0.1386

Tabla 34: Varianza y desviación típica de la eficiencia bruta agendada por modelo.

Resulta interesante analizar la variabilidad de los valores obtenidos en el resto de indicadores, ya que no es evidente si esta depende parámetro de optimización considerado en cada modelo. En la Tabla 35 se muestran los valores de desviación típica para cada indicador y modelo. Lo primero que destaca es que las eficiencias agendadas (tanto bruta como neta) presentan menor dispersión que las correspondientes eficiencias reales, lo que probablemente se deba al efecto de la incertidumbre en la duración de las intervenciones. Esta misma tendencia se aprecia en otros indicadores que diferencian entre valores agendados y reales, como la duración media de las intervenciones o el tiempo de uso de

Desviación típica						
	Modelo base	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
Eficiencia bruta agendada	0.5260	0.6151	0.4576	0.8170	1.3411	0.1386
Eficiencia bruta real	2.9731	2.6980	2.8505	2.8911	2.2349	1.4073
Eficiencia neta agendada	0.6130	0.6229	0.5373	0.7833	1.0734	0.2551
Eficiencia neta real	2.9769	2.7085	2.8651	2.8068	2.1154	4.4160
Nº de intervenciones	3.8903	4.0174	3.9978	4.4472	3.8215	2.7469
Nº de intervenciones por quirófano	0.1295	0.1466	0.1301	0.1424	0.1187	0.099
Duración media agendada intervenciones [min]	4.4227	4.4180	4.5160	5.1845	4.3455	7.4165
Duración media real intervenciones [min]	5.7985	5.7007	5.8750	5.9091	4.9462	10.6025
Tiempo medio agendado por quirófano [min]	2.9747	3.0230	2.6073	3.7953	5.2049	1.2331
Tiempo medio de uso por quirófano [min]	14.4334	13.1323	13.8911	13.6137	10.2636	21.4130
Porcentaje de sesiones con sobreuso	0.0978	0.0770	0.0915	0.0891	0.0343	0.1125
Tiempo medio de sobreuso [min]	16.8635	16.4323	16.7648	19.5153	23.0333	21.0150
Tiempo medio sin uso [min]	7.8227	7.5096	7.5252	8.3882	10.3614	10.3900
Nº de quirófanos usados	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 35: Desviación típica de los distintos indicadores de rendimiento por modelo.

los quirófanos. En términos generales, los valores de desviación se mantienen contenidos, lo que refleja un comportamiento relativamente estable de la mayoría de indicadores, con variaciones moderadas que no comprometen la coherencia global de los resultados.

8.2.1.2 Influencia del número de quirófanos

El objetivo de este análisis es comprobar si aumentar el número de quirófanos disponibles mejora los indicadores de eficiencia del bloque quirúrgico o incrementa el número de intervenciones realizadas por quirófano. En la Tabla 14 se muestran los valores medios obtenidos para los distintos modelos al aplicar cada una de las tres configuraciones de quirófanos (2, 4 y 6), manteniendo constantes el resto de parámetros experimentales.

A nivel general, puede observarse que el número total de intervenciones realizadas aumenta claramente con la disponibilidad de quirófanos en todos los modelos, lo cual es lógico dado que se amplía la capacidad disponible de programación. El modelo base, por ejemplo, pasa de 37.47 intervenciones con 2 quirófanos a 112.47 con 6. Esta tendencia se mantiene en el resto de modelos. En cuanto al número medio de intervenciones por quirófano, los valores se mantienen bastante estables en todos los modelos, lo que sugiere un reparto homogéneo de la carga quirúrgica independientemente del número de quirófanos disponibles. Las eficiencias brutas y netas (tanto agendadas como reales) presentan ligeras oscilaciones entre configuraciones, pero se mantienen relativamente estables en la mayoría de los modelos, especialmente en el modelo base y el modelo 1.

Para el resto de indicadores de rendimiento analizados, no se observa ningún patrón claro ni una tendencia significativa asociada a la variación del número de quirófanos disponibles. Sus valores se mantienen relativamente estables en todos los escenarios evaluados.

Otro aspecto a destacar es que, en algunos de los escenarios analizados, la eficiencia bruta real alcanza valores superiores al 100 %. Este fenómeno se explica porque, mientras que la eficiencia agendada se calcula a partir del valor medio de la duración estimada para cada intervención, la eficiencia real incorpora la incertidumbre asociada a dicha duración. En consecuencia, puede ocurrir que, en la práctica, las intervenciones programadas superen el tiempo disponible en los quirófanos, generando una ocupación efectiva mayor a la capacidad de los quirófanos. Este comportamiento refleja la influencia directa de la variabilidad en los tiempos quirúrgicos sobre los resultados de la programación.

En conclusión, los resultados muestran que, aunque disponer de un mayor número de quirófanos permite incrementar el número total de intervenciones realizadas (como era previsible), esta mejora no se traduce necesariamente en un aumento significativo de los

indicadores de eficiencia, ni tampoco en una mejora sustancial del rendimiento por quirófano. El hecho de que métricas como las eficiencias brutas y netas, o el número medio de intervenciones por quirófano, se mantengan prácticamente constantes al incrementar el número de recursos, sugiere que la programación quirúrgica no mejora de forma más que proporcional con la disponibilidad de quirófanos.

8.2.1.3 Influencia del número de días en el horizonte temporal

El objetivo de este análisis es comprobar si aumentar el horizonte temporal de la programación mejora los indicadores de eficiencia del bloque quirúrgico o incrementa el número de intervenciones realizadas por quirófano. Los resultados obtenidos para cada modelo y cada configuración de días se presentan en la Tabla 16, que recoge las métricas medias correspondientes a los 100 escenarios generados por cada combinación.

A nivel general, puede observarse que el número total de intervenciones realizadas aumenta de forma significativa a medida que se amplía el horizonte temporal, lo cual es lógico dado que se amplía la capacidad disponible de programación. El modelo base, por ejemplo, pasa de 21.40 intervenciones en 1 día a 112.47 en 5 días. Esta tendencia se mantiene en todos los modelos, aunque con distintas intensidades. En cuanto al número medio de intervenciones por quirófano, se observa también una tendencia ascendente en el modelo base, 1, 2, 3 y 4, es decir, en los que se maximiza el número de intervenciones. En el modelo base, por ejemplo, se pasa de 3.57 intervenciones por quirófano con un horizonte temporal de un día, a 3.75 para un horizonte de cinco días. Esto se debe a que aumentar el horizonte temporal implica disponer de un mayor número de intervenciones con las que realizar la asignación. Por tanto, es más probable encontrar intervenciones de menor duración que encajen con los huecos disponibles y permitan aumentar la ratio de intervenciones por quirófano.

Para los indicadores de rendimiento relativos a la eficiencia bruta y neta, en estos modelos no se observa ningún patrón claro ni una tendencia significativa asociada a la variación del horizonte temporal. Esto implica que la variación de este parámetro, a pesar de tener un impacto directo sobre el número de intervenciones realizadas por quirófano, no afecta a la eficiencia relativa de los modelos. Por otro lado, en el modelo 5, cuyo objetivo es maximizar la ocupación de los quirófanos, se observa una tendencia ascendente en la eficiencia bruta, pero no se observa ningún efecto claro sobre el número de intervenciones por quirófano.

Todo esto pone de manifiesto que ampliar el número de días disponibles para la programación quirúrgica mejora el rendimiento de los algoritmos, ya sea aumentando el número de intervenciones realizadas por quirófanos o aumentando la eficiencia bruta de los quirófanos. Por tanto, puede ser una opción interesante, siempre que sea posible, aumentar el horizonte temporal de la programación para encontrar mejores soluciones,

lograr un mayor rendimiento del bloque y, además, disponer de mayor antelación para preparar las intervenciones.

8.2.1.4 Comparativa de modelos con baja saturación

En la Tabla 18, se presentan los resultados medios obtenidos para cada uno de los modelos en este escenario de baja presión asistencial, en el que la demanda quirúrgica representa solo el 50 % de la capacidad disponible.

En este contexto de baja saturación, los resultados muestran un comportamiento muy homogéneo entre la mayoría de modelos, tanto en términos de eficiencia como de actividad programada. Los modelos base, 1, 2, 4 y 5 presentan prácticamente los mismos valores en eficiencia bruta (alrededor del 55.6 %) y neta (alrededor del 50.6 %), tanto para las métricas agendadas como reales. Esto indica que, al haber una capacidad disponible mayor que la demanda de intervenciones quirúrgicas, las decisiones de programación no se ven tan condicionadas por las restricciones de los modelos, y todos son capaces de obtener un rendimiento bastante similar.

El número medio de intervenciones realizadas también se mantiene prácticamente constante entre modelos (alrededor de 48.5 intervenciones), con la única excepción del modelo 3, que incorpora restricciones sobre la disponibilidad de los cirujanos y reduce ligeramente su capacidad de programación (43.92 intervenciones). Esta diferencia se traduce también en una menor eficiencia en este modelo, con valores brutos y netos algo más bajos que el resto.

Sin embargo, lo más destacable en este estudio es que, a diferencia de otros contextos en los que es necesario utilizar todos los quirófanos disponibles para atender la demanda quirúrgica, en este escenario de exceso de oferta no es necesario hacer uso de todos ellos. Esto abre la posibilidad de minimizar el número de quirófanos utilizados con el objetivo de reducir también los costes. Mientras que el modelo 4 utiliza de media 5.92 quirófanos y el modelo 2 emplea 5.20, el modelo 1 solo necesita 3.47 quirófanos de media para proporcionar el máximo rendimiento posible, es decir, en torno a un 30 % menos de quirófanos para este caso concreto.

Cabe destacar que el modelo 1 presenta como contrapartida un porcentaje significativamente mayor de sesiones con sobreuso en comparación con el resto de modelos, así como una mayor duración media de dicho sobreuso. Este comportamiento se explica por la propia lógica del modelo: al concentrar las intervenciones en un menor número de quirófanos, estos se utilizan al máximo de su capacidad, reduciendo los márgenes disponibles para absorber imprevistos. En contextos con incertidumbre en la duración de las intervenciones, como el que se ha simulado, esta falta de flexibilidad incrementa la probabilidad de que las jornadas quirúrgicas se extiendan más allá del

horario previsto, algo que ocurre con menor frecuencia en aquellos contextos en los que los quirófanos no se utilizan al máximo de su capacidad.

En conjunto, estos resultados muestran que, en escenarios con baja demanda, la mayoría de modelos convergen hacia soluciones similares en cuanto a eficiencia y actividad, logrando valores prácticamente idénticos en términos de intervenciones realizadas y aprovechamiento del tiempo disponible. Sin embargo, el modelo 1, que está diseñado no solo para maximizar el número de intervenciones, sino también para minimizar el número de quirófanos utilizados, resulta especialmente interesante, ya que proporciona prácticamente la misma eficiencia operativa que el resto de modelos, pero haciendo un uso sensiblemente menor de los recursos disponibles.

8.2.1.5 Influencia del tiempo de ejecución

En las Tabla 20 y Tabla 21 se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas para cada uno de los modelos, utilizando distintos tiempos máximos de ejecución para cada simulación.

En los modelos base, 1, 2, 3 y 4, el parámetro más representativo para evaluar la mejora en la solución es el número de intervenciones por quirófano. En general, se observa una ligera tendencia creciente para este valor a medida que se amplía el tiempo de ejecución, pero el incremento es muy reducido. Por ejemplo, en el modelo base se alcanza una media de 3.69 intervenciones por quirófano con solo 1 minuto de ejecución, mientras que con 10 minutos se alcanza un valor de 3.73, lo que supone un aumento de tan solo 0.04 intervenciones por quirófano tras multiplicar por diez el tiempo de cómputo. Este patrón se repite en los demás modelos, con variaciones mínimas.

Algo similar se observa en el modelo 5, cuyo objetivo principal es maximizar la eficiencia bruta del bloque quirúrgico. En este caso, con un tiempo de ejecución de 1 minuto se alcanza una eficiencia bruta agendada del 99.63 %, mientras que con 10 minutos se incrementa únicamente hasta el 99.76 %, lo que representa una mejora de apenas 0.13 puntos porcentuales. A pesar de ser el modelo con mejores resultados en eficiencia, el impacto de extender el tiempo de cálculo sigue siendo marginal.

En vista de estos resultados, puede concluirse que ampliar el tiempo de ejecución no proporciona mejoras suficientemente significativas como para justificar el coste computacional adicional. En general, se ha observado que con un tiempo de ejecución de tan solo 1 minuto los algoritmos son capaces de generar soluciones de muy alta calidad en tiempos extremadamente reducidos.

8.2.1.6 Análisis del modelo 4 con distintos niveles de confianza

En la Tabla 23, se muestran los resultados obtenidos en el experimento realizado con el modelo 4 bajo distintos niveles de confianza, que van del 99 % al 55 %.

En general, puede apreciarse una clara tendencia creciente en las eficiencias (tanto brutas como netas, agendadas y reales) a medida que se reduce el nivel de confianza permitido. Con valores más conservadores (por ejemplo, una confianza del 99 %), el modelo genera planificaciones mucho más prudentes, lo que se traduce en eficiencias brutas en torno al 63 %. Al disminuir la confianza al 55 %, estos valores mejoran significativamente, alcanzando eficiencias brutas del 94.81 % y netas del 83.40 %. Esto indica que relajar la restricción estocástica permite aprovechar mejor los recursos disponibles, a costa de asumir un mayor riesgo de sobreutilización.

En cuanto al número de intervenciones, se observa un crecimiento progresivo conforme aumenta el nivel de confianza, pasando de 79.27 operaciones con un 99 % de confianza a 109.57 con un 55 %. De forma coherente, el número medio de intervenciones por quirófano también se incrementa (de 2.64 a 3.65), reflejando un mayor aprovechamiento de la capacidad instalada cuando el modelo permite asumir más riesgo de sobreutilización.

El porcentaje de sesiones con sobreuso, como es de esperar, crece en sentido contrario que el nivel de confianza, ya que son dos caras de la misma moneda. Esta tendencia también se refleja en el tiempo medio de sobreuso, que aumenta progresivamente desde 4.07 minutos hasta un máximo de 60.26 minutos. Sin embargo, como se explicó en el Capítulo 4, la implementación de este modelo alternativo ha requerido una serie de aproximaciones y suposiciones matemáticas que han hecho que la restricción de probabilidad sea más conservadora. Esto se traduce en que, para cada nivel de confianza fijado, el modelo tiende a programar las sesiones quirúrgicas con mayor margen de seguridad. Como resultado, el porcentaje real de sesiones con sobreuso es significativamente inferior al valor de probabilidad establecido, lo que pone de manifiesto el efecto protector de dichas aproximaciones.

Por último, en lo que respecta al tiempo medio sin uso por quirófano, se aprecia una reducción considerable al reducir el nivel de confianza. Con una política conservadora (99 %), los quirófanos permanecen inactivos una media de 176.17 minutos al día, mientras que con niveles más permisivos (55 %) este valor baja hasta los 41.79 minutos. Esta disminución refleja una mayor eficiencia operativa, aunque con un riesgo creciente de sobrepasar los límites de planificación establecidos.

Estas tendencias se representan de forma visual en las Figura 15 y Figura 16. En la primera, se muestran las curvas correspondientes a la eficiencia bruta, la eficiencia neta, el número total de intervenciones realizadas y el número medio de intervenciones por quirófano. Se observa claramente cómo todas estas métricas mejoran de manera progresiva conforme se relaja la restricción de confianza.

Por otro lado, la Figura 16 recoge la evolución del porcentaje de sesiones con sobreutilización, el tiempo medio de sobreuso y el tiempo medio sin uso por quirófano. Estas variables reflejan el coste operativo asociado a dicha relajación: al disminuir el nivel de confianza permitido, crece la sobreutilización y el porcentaje de sesiones con sobreuso, pero disminuye el tiempo de inactividad, lo que pone en evidencia el equilibrio entre eficiencia y seguridad que este modelo permite ajustar.

En conjunto, los resultados muestran claramente el compromiso entre eficiencia y seguridad: un menor nivel de confianza permite mejorar la productividad del bloque quirúrgico, pero también incrementa el riesgo de extender las jornadas quirúrgicas más allá del tiempo planificado. Por tanto, la elección del nivel de confianza óptimo dependerá de las prioridades del centro hospitalario y su grado de tolerancia al riesgo.

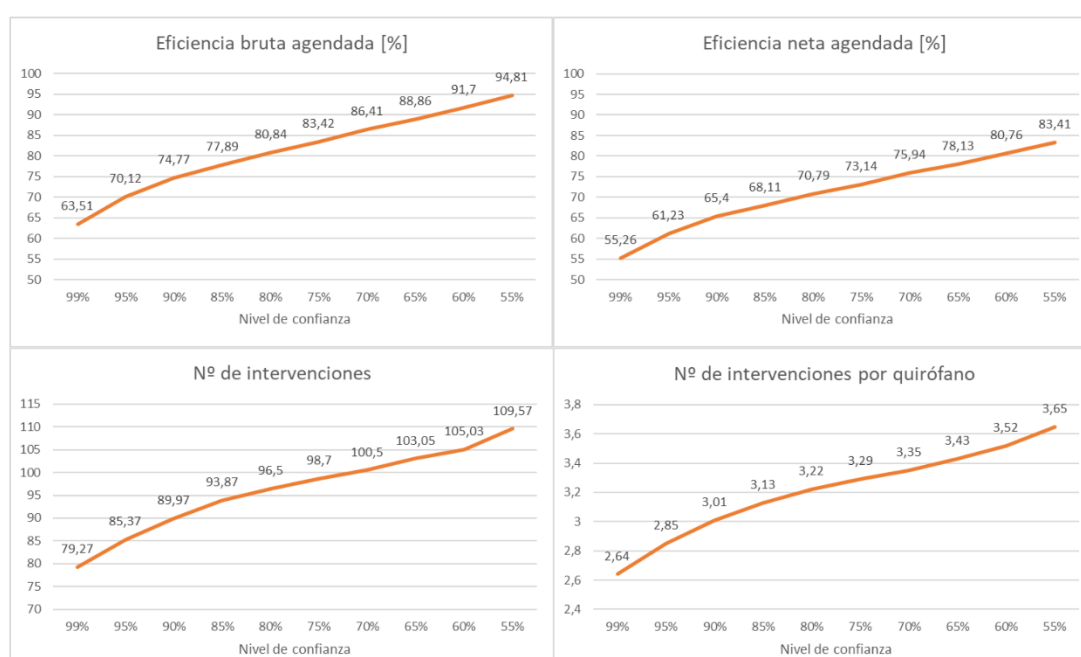


Figura 15: Evolución de la eficiencia bruta, neta, número de intervenciones y número de intervenciones por quirófano en función del nivel de confianza permitido.

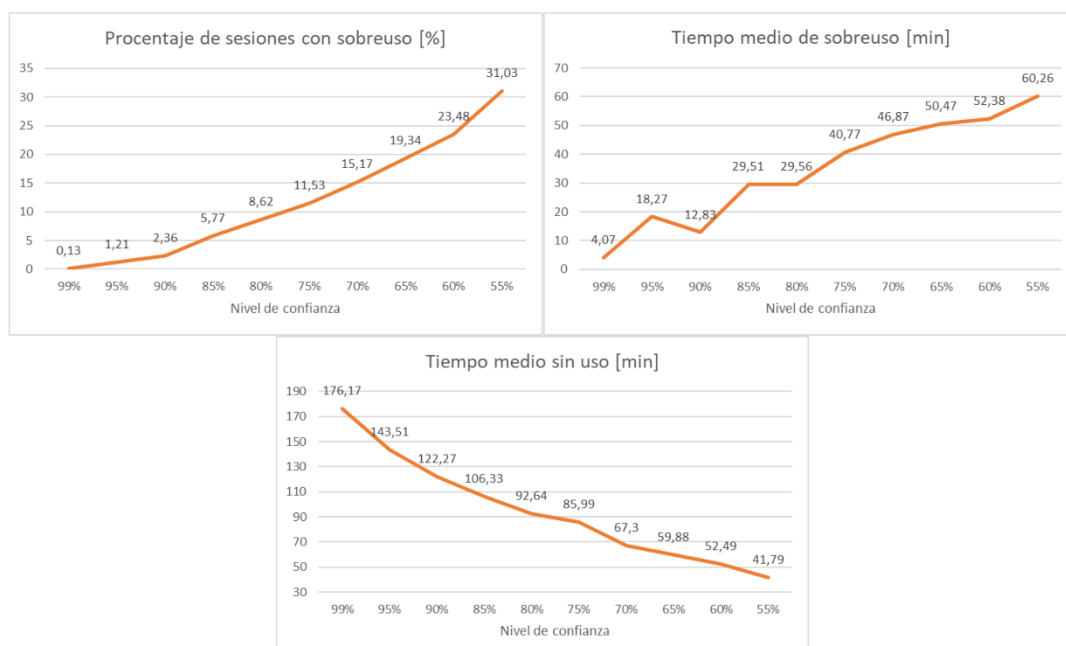


Figura 16: Evolución del porcentaje de sesiones con sobreuso, tiempo medio de sobreuso y tiempo medio sin uso en función del nivel de confianza permitido.

8.2.1.7 Influencia del tiempo de rotación

En las Tabla 25 y Tabla 26 se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas para cada uno de los modelos bajo distintos tiempos de rotación entre intervenciones.

De manera global, puede observarse que los modelos presentan patrones de comportamiento similares ante el incremento del tiempo de rotación, con variaciones más o menos acusadas dependiendo del caso. Una de las observaciones más destacadas es que la eficiencia bruta (agendada y real) se mantiene notablemente estable en todos los modelos a pesar del aumento progresivo del tiempo de rotación. Esto se debe a que este indicador incluye tanto el tiempo de cirugía como los tiempos de rotación, por lo que no se ve penalizado por la ampliación de estos últimos.

En cambio, la eficiencia neta (tanto agendada como real) sí se ve afectada de manera significativa por el incremento en el tiempo de rotación. Este comportamiento es coherente con la definición del indicador, ya que únicamente considera el tiempo efectivo dedicado a las intervenciones quirúrgicas. Así, al aumentar el tiempo de rotación, la proporción del tiempo útil (cirugía) sobre el total disponible disminuye. En la Tabla 36 se presenta la diferencia entre eficiencia bruta y eficiencia neta para cada modelo y cada escenario. En la Figura 17 se muestra visualmente cómo este “tiempo no productivo” se incrementa con rotaciones más largas.

Diferencia entre la eficiencia bruta y neta agendada [puntos porcentuales]					
Tiempo de rotación [min]	10	15	20	25	30
Modelo base	7,99	11,53	15,05	18,14	21,35
Modelo 1	7,99	11,53	15,05	18,12	21,32
Modelo 2	7,93	11,45	14,95	18,04	21,23
Modelo 3	7,62	11,04	14,45	17,34	20,35
Modelo 4	6,11	8,89	11,56	13,92	16,47
Modelo 5	5,47	7,59	9,44	10,75	12,55

Tabla 36: Diferencia en puntos porcentuales entre la eficiencia bruta y neta agendada para cada modelo en función del tiempo de rotación.

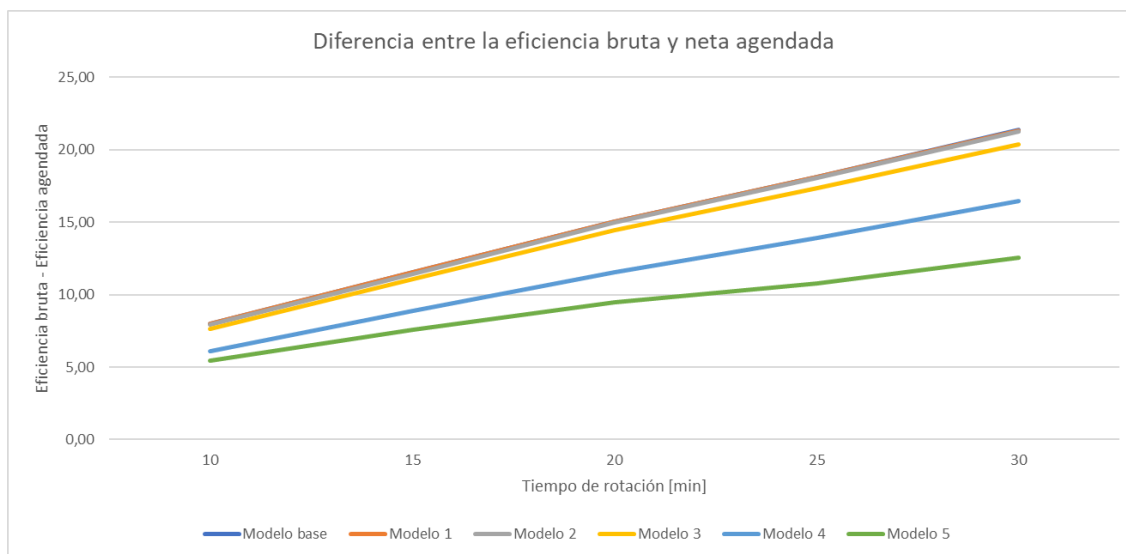


Figura 17: Gráfica con la diferencia en puntos porcentuales entre la eficiencia bruta y neta agendada para cada modelo en función del tiempo de rotación.

Otro efecto visible del aumento del tiempo de rotación es la reducción tanto en el número total de intervenciones realizadas como en el número medio de intervenciones por quirófano. A medida que se incrementa el tiempo dedicado a tareas no asistenciales, disminuye el espacio disponible para programar operaciones, lo que repercute directamente en la capacidad asistencial. Esta caída es especialmente pronunciada en el modelo 5, donde se pasa de 78.77 intervenciones con 10 minutos de rotación a solo 60.23 con 30 minutos, acompañada de una reducción en intervenciones por quirófano de 2.63 a 2.01.

El resto de indicadores se mantienen relativamente estables o presentan variaciones poco significativas. No se aprecia una tendencia clara en estos casos, lo que indica que el tiempo de rotación no tiene un impacto directo sobre ellos.

Como se ha podido observar, los modelos desarrollados proporcionan de forma consistente valores de eficiencia bruta muy estables. Sin embargo, para que esta alta eficiencia bruta se traduzca también en una eficiencia neta elevada, resulta fundamental considerar el impacto del tiempo de rotación. En concreto, el tiempo total dedicado a estas

tareas no asistenciales depende tanto del número de intervenciones asignadas a un quirófano como del tiempo medio de rotación establecido. Cuanto menor sea este tiempo total de rotación, menor será la diferencia entre la eficiencia bruta y la eficiencia neta, y mayores serán los valores alcanzados por esta última. Por tanto, si bien los algoritmos son capaces de mantener un buen nivel de aprovechamiento global del tiempo disponible, la mejora real en términos de eficiencia quirúrgica neta requiere disminuir este tiempo de rotación, optimizando también los procesos logísticos y organizativos que rodean a la actividad quirúrgica propiamente dicha.

8.2.1.8 Influencia de la incertidumbre en la duración de las intervenciones

En las Tabla 28 y Tabla 29 se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas para cada uno de los modelos, bajo distintos niveles de incertidumbre en la duración real de las intervenciones quirúrgicas.

Desde un punto de vista general, puede observarse un patrón común de comportamiento en los modelos base, 1, 2, 3 y 5. En estos modelos, tanto la eficiencia bruta como la eficiencia neta agendada se mantienen prácticamente constantes a medida que se incrementa la desviación típica de la duración de las intervenciones. Del mismo modo, el número de intervenciones y el número de intervenciones por quirófano también permanecen estables, lo que sugiere que la capacidad de programación se mantiene constante, independientemente del nivel de incertidumbre.

No obstante, sí se observan diferencias significativas en los indicadores relacionados con la ejecución real del plan. El porcentaje de sesiones con sobreutilización aumenta progresivamente conforme se incrementa la variabilidad en la duración quirúrgica. Este comportamiento es esperable, ya que una mayor incertidumbre eleva la probabilidad de que una cirugía se extienda más allá del tiempo agendado, generando retrasos en la agenda. Asimismo, el tiempo medio de sobreuso crece de forma considerable, alcanzando valores superiores a los 90 minutos en los escenarios de mayor desviación.

El comportamiento del modelo 4, diseñado específicamente para incorporar una restricción de robustez estocástica, es distinto. En este caso, a medida que se incrementa la desviación estándar, el modelo reacciona generando planificaciones más conservadoras, lo que se traduce en una reducción progresiva de la eficiencia bruta y neta agendada. Por ejemplo, la eficiencia bruta agendada cae del 85.16 % con una desviación del 10 % al 55.60 % con una desviación del 50 %. Esta penalización en la eficiencia es el resultado de restringir deliberadamente el número y duración de las intervenciones programadas para reducir el riesgo de sobreutilización.

Este planteamiento conservador también se refleja en una disminución del número de intervenciones realizadas (de 99.53 a 72.07) y del número de intervenciones por quirófano (de 3.32 a 2.40), lo que implica una menor ocupación efectiva del bloque quirúrgico conforme aumenta la incertidumbre.

Al igual que en los modelos anteriores, en el modelo 4 se observa que el porcentaje de sesiones con sobreuso tiende a aumentar. Del mismo modo, el tiempo medio de sobreuso aumenta, ya que las sesiones que se ven afectadas por sobreutilización tienden a presentar desviaciones más acusadas. Finalmente, también se aprecia un incremento notable del tiempo medio sin uso por quirófano, que llega a superar los 200 minutos diarios en los escenarios de mayor incertidumbre, como resultado directo de la programación conservadora impuesta por el modelo.

En conjunto, los resultados de este experimento permiten concluir que los modelos estándar no reaccionan de forma significativa ante el aumento de la incertidumbre, manteniendo una planificación estable, aunque con mayor riesgo de sobreuso. Por el contrario, el modelo 4 muestra una capacidad de adaptación más marcada, reduciendo eficazmente los niveles de sobreutilización, pero a costa de una menor eficiencia global y de una reducción en la actividad programada. Esto refuerza la utilidad del modelo 4 en entornos donde la fiabilidad de la programación es prioritaria, incluso a costa de sacrificar capacidad asistencial.

8.2.1.9 Influencia de la saturación de la demanda

En las Tabla 31 y Tabla 32 se presentan los resultados medios obtenidos para cada uno de los modelos bajo distintos niveles de saturación de la demanda quirúrgica.

Desde una perspectiva general, se aprecia que, en el modelo base, 1, 2, 3 y 4, un mayor nivel de saturación se traduce en un aumento progresivo de la eficiencia bruta, tanto agendada como real. Además, tanto el número total de intervenciones realizadas como el número medio de intervenciones por quirófano, presentan una evolución ascendente clara en estos modelos. Este comportamiento es lógico, ya que, al incrementarse el volumen de pacientes pendientes de intervención, el sistema dispone de un mayor número de intervenciones potenciales para seleccionar aquellas que mejor encajan en los huecos de agenda disponibles (habitualmente más cortas), maximizando así la ocupación del bloque quirúrgico y realizando más procedimientos dentro del mismo periodo.

Este fenómeno se ve reforzado por el hecho de que la duración media de las intervenciones tiende a reducirse a medida que aumenta la saturación, lo que sugiere que los modelos priorizan cirugías más breves para aprovechar al máximo los huecos

disponibles. Es decir, cuanto más oferta de intervenciones existe, más fácil es que los modelos encuentren combinaciones que permitan maximizar el criterio establecido.

Sin embargo, este aumento de eficiencia bruta no se refleja del mismo modo en la eficiencia neta. De hecho, se observa una ligera tendencia decreciente en este indicador a medida que aumenta la saturación. La divergencia entre ambas métricas puede explicarse por el hecho de que, con más intervenciones programadas, también aumentan proporcionalmente los tiempos de rotación necesarios entre cirugías, lo que reduce el porcentaje de tiempo útil dedicado exclusivamente a la actividad quirúrgica. En consecuencia, la diferencia entre eficiencia bruta y eficiencia neta se amplía a medida que la saturación aumenta.

Una excepción notable a esta lógica general es el comportamiento del modelo 5. Mientras que el resto de modelos tienden a seleccionar intervenciones más cortas para incrementar el número total de procedimientos, el modelo 5 presenta una estrategia opuesta: a medida que la saturación crece, realiza menos intervenciones, pero de mayor duración, lo que responde a su diseño orientado a maximizar la eficiencia en lugar del número total de pacientes atendidos. Aun así, los valores de eficiencia bruta y neta se mantienen razonablemente estables, es decir, no se observa una mejora en el parámetro que trata de maximizar el modelo. Esto puede deberse a que, con valores tan elevados de eficiencia bruta (superiores al 99.50 %) es difícil obtener mejoras.

En conjunto, los resultados ponen de manifiesto que los modelos diseñados para maximizar el número de intervenciones se benefician de escenarios con mayor saturación. Es decir, cuanto mayor es el volumen de intervenciones en lista de espera, más opciones tienen los algoritmos para construir soluciones eficientes, adaptadas a sus objetivos específicos. Esto refuerza la idea de que disponer de un mayor conjunto de posibles combinaciones mejora la capacidad de optimización del sistema. Sin embargo, aquellos modelos centrados en la eficiencia, presentan un comportamiento esperable en todos los parámetros, pero no muestran una mejora en eficiencia del bloque.

8.2.1.10 Influencia de la duración media de las intervenciones

En la Tabla 33 se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas para cada uno de los modelos bajo los tres escenarios definidos de duración media de las intervenciones.

En general, se observa que en la mayoría de los modelos la eficiencia bruta disminuye ligeramente a medida que aumenta la duración media de las intervenciones, mientras que la eficiencia neta mejora significativamente. Este comportamiento puede explicarse por el hecho de que, con intervenciones más largas, se reduce la proporción del tiempo dedicado a rotaciones o tiempos muertos en relación con el tiempo total

disponible. Así, aunque se realizan menos procedimientos, estos ocupan más tiempo útil, lo que mejora la eficiencia neta, pero reduce ligeramente la bruta.

De forma coherente, también se aprecia una clara disminución en el número total de intervenciones realizadas y en el número medio de intervenciones por quirófano. Por ejemplo, en el modelo base se pasa de una media de 238.48 intervenciones en el escenario 1 (intervenciones breves) a 95.80 en el escenario 3 (intervenciones largas). El número de intervenciones por quirófano desciende de 7.95 a 3.19 en ese mismo modelo. Este comportamiento es natural, ya que intervenciones más largas ocupan más espacio en la planificación, reduciendo la cantidad total de procedimientos que pueden programarse en una misma jornada.

El modelo 5, diseñado para maximizar la ocupación quirúrgica sin priorizar el número de intervenciones, presenta un comportamiento diferente. En su caso, la eficiencia bruta se mantiene prácticamente constante entre los distintos escenarios, mientras que la eficiencia neta aumenta. Este modelo realiza menos intervenciones a medida que aumenta su duración, lo que está alineado con su lógica de diseño: prefiere realizar cirugías más largas que permiten ocupar grandes bloques de tiempo de forma continua, maximizando así la utilización total sin dejar huecos no aprovechables.

Otro efecto que se observa de forma transversal es que el tiempo medio sin uso por quirófano tiende a aumentar conforme las intervenciones se alargan. Esto puede deberse a que, con cirugías largas, es más difícil encontrar combinaciones exactas que llenen toda la jornada sin dejar espacios residuales difíciles de utilizar. Además, el tiempo medio de sobreuso también aumenta, ya que, a mayor duración media de las intervenciones, mayor es la incertidumbre asociada a su duración real. Esta mayor variabilidad incrementa el riesgo de que las sesiones quirúrgicas se prolonguen más allá del tiempo planificado.

En resumen, los resultados evidencian que los distintos modelos se adaptan al incremento de la duración media de las intervenciones, aunque con consecuencias diferenciadas según su lógica de funcionamiento. Los modelos orientados a maximizar el número total de intervenciones tienden a perder eficiencia bruta en contextos con cirugías más largas, ya que se reduce el número de combinaciones viables dentro del tiempo disponible. Por el contrario, enfoques como el del modelo 5, centrado en maximizar la ocupación del quirófano, logran sacar mayor partido de estos escenarios al optimizar el uso del tiempo, manteniendo estable la eficiencia bruta e incrementando notablemente la eficiencia neta. En términos generales, a medida que aumentan los tiempos quirúrgicos, se observa una mejora de la eficiencia neta, lo cual indica un mejor aprovechamiento del tiempo real de quirófano, aunque a costa de realizar un menor número de intervenciones.

8.2.2 Comparativa con otros autores

En este subapartado se contrastan los resultados alcanzados con los recogidos en la literatura científica, con el fin de identificar el valor añadido que aporta este trabajo respecto a estudios previos. En primer lugar, se analizan los enfoques seguidos por diversos autores a la hora de resolver este problema, ubicando este trabajo dentro de ese espectro. A continuación, se seleccionan tres investigaciones cuyo planteamiento guarda una mayor similitud con el seguido en este TFG, comentando en detalle sus metodologías y resultados, y estableciendo una comparativa con los obtenidos en este estudio. Finalmente, se contrasta el rendimiento de los modelos desarrollados con los indicadores actuales del HCUV, donde la programación quirúrgica todavía se realiza de forma manual.

Este trabajo ha planteado la programación quirúrgica del HCUV como un problema de optimización, lo que ha permitido formalizar un proceso tradicionalmente complejo y gestionado de forma manual en un marco matemático concreto. Con esta base, se ha diseñado un modelo inicial que recoge los elementos fundamentales del sistema (quirófanos, profesionales, estimaciones de duración y prioridades clínicas) y, a partir de él, se han desarrollado diferentes variantes. Estas versiones alternativas buscan, por un lado, acercarse más a las condiciones reales del entorno hospitalario y, por otro, explorar estrategias que permitan mejorar el rendimiento del bloque quirúrgico. Todos los modelos han sido implementados y resueltos mediante el *solver* Gurobi, que ha permitido traducir la formulación matemática a un entorno computacional y obtener soluciones óptimas en tiempos muy reducidos. Dado que no se disponía de datos clínicos reales, se ha recurrido a la generación de datos sintéticos basados en distribuciones estadísticas documentadas en la literatura (Molina-Pariente, et al., 2015), lo que ha posibilitado la validación de los modelos de manera controlada y sistemática. Finalmente, se ha evaluado su comportamiento en múltiples escenarios, analizando el efecto de variaciones en parámetros como el horizonte temporal, el número de quirófanos, la saturación de la demanda o la duración media de las intervenciones.

En cuanto a los resultados obtenidos, cabe destacar en primer lugar que el modelo base alcanza un rendimiento muy elevado, con un índice de ocupación bruto superior al 97 % y una eficiencia neta por encima del 86 %. Por su parte, el modelo alternativo 4, que incorpora la restricción estocástica de sobreuso, muestra un comportamiento especialmente interesante: con niveles de confianza muy conservadores (99 %) genera planificaciones prudentes, pero con eficiencias brutas limitadas, en torno al 63 %; mientras que al relajar la confianza hasta el 55 % se alcanzan valores de eficiencia bruta cercanos al 95 % y de eficiencia neta superiores al 83 %. Esta mejora se acompaña, como es esperable, de un aumento en el porcentaje de sesiones con sobreutilización, que pasa

de prácticamente inexistente en escenarios conservadores a algo más del 30 % con los niveles de confianza más bajos.

La literatura especializada en la planificación y programación de quirófanos ha mostrado un desarrollo significativo en las últimas décadas, con un crecimiento notable del interés investigador a partir del año 2000. Este ámbito se centra en resolver los retos de gestión de los quirófanos con el propósito de optimizar recursos, reducir gastos y mejorar la satisfacción de pacientes y profesionales. Los estudios realizados en esta área pueden clasificarse atendiendo a diferentes criterios (Cardoen, et al., 2010).

En primer lugar, según las **medidas de rendimiento** que buscan mejorar, entre las que se encuentran el tiempo de espera del paciente (Arenas, et al., 2002) o del cirujano (Gupta, 2007), la utilización de quirófanos (Baumgart, et al., 2007) incluyendo subutilización (Adan & Vissers, 2002) y sobreutilización (Chaabane, et al., 2006), el balanceo de recursos disponibles (Beliën, et al., 2006) o la mejora de indicadores financieros (Kuo, et al., 2003), entre otros. En segundo lugar, según el **aspecto de la programación que se decide modificar**, como la fecha (Adan & Vissers, 2002), la hora (Baumgart, et al., 2007), el quirófano asignado (Cardoen, et al., 2009) o la capacidad medida en horas de quirófano (Persson & Persson, 2009). También se diferencian en función de la **técnica empleada para encontrar la solución**, donde se incluyen métodos de programación matemática (Basson & Butler, 2006), simulación (Denton, et al., 2006), heurísticas (Hans, et al., 2008), y procedimientos analíticos (Van Houdenhoven, et al., 2007).

Otro criterio de clasificación es la **consideración de la incertidumbre**: algunos trabajos adoptan enfoques deterministas que la ignoran (Blake, et al., 2002), mientras que otros aplican enfoques estocásticos que la incorporan de forma explícita, ya sea en la llegada de pacientes (Lamiri, et al., 2008) y/o en la duración de las cirugías (Gladish, et al., 2005). Finalmente, se pueden diferenciar según el **grado de aplicabilidad**, distinguiendo los estudios que no realizan pruebas (Gupta, 2007), los que emplean datos teóricos para validar sus modelos (Pham & Klinkert, 2008) y los que recurren a datos reales (Baumgart, et al., 2007).

El trabajo desarrollado en este TFG se enmarca dentro de los estudios que buscan mejorar la utilización de los quirófanos, ya sea en términos de tiempo de uso o de número de intervenciones realizadas, como principal indicador de rendimiento. A nivel de decisión, se centra en la asignación de fecha y quirófano a las intervenciones que se encuentran en lista de espera. Desde el punto de vista metodológico, se ha optado por un enfoque de programación matemática entera mixta, implementado y resuelto con el *solver* Gurobi. En cuanto al tratamiento de la incertidumbre, el modelo base se formula de manera determinista, mientras que el modelo alternativo 4 introduce un planteamiento

estocástico mediante restricciones probabilísticas sobre el sobreuso. Finalmente, en relación con la aplicabilidad, el trabajo se sitúa en el grupo que valida sus propuestas con datos teóricos o sintéticos, al no disponer de datos clínicos reales para la experimentación.

Otros estudios, como el realizado por (Fei, et al., 2010), también ponen el foco principal en mejorar la utilización de quirófanos. A nivel de decisión, este trabajo aborda tanto la asignación de fechas como la secuenciación de operaciones dentro de cada jornada. Metodológicamente, se plantea una resolución en dos fases: una planificación formulada como un modelo de programación entera resuelto con un procedimiento heurístico, y una programación diaria tratada como un problema de *job shop scheduling* mediante algoritmos genéticos. En cuanto a la incertidumbre, el modelo es de naturaleza determinista, y se valida con datos reales de más de 6000 registros de quirófano de un hospital universitario belga.

En términos de resultados, el estudio analiza tres escenarios diferenciados según el número de pacientes en lista de espera: 53, 101 y 131 casos. Para el escenario más reducido (53 casos), la tasa de utilización de quirófanos obtenida con el método propuesto fue del 84,97 %, ligeramente inferior al 89,69 % registrado en la programación real del hospital, aunque con una reducción muy significativa del tiempo inactivo. En el escenario intermedio (101 casos), el modelo superó al horario hospitalario, alcanzando un 90,26 % de utilización frente al 89,90 % de la práctica real. Finalmente, en el escenario de mayor carga (131 casos), el método propuesto logró un resultado especialmente destacable, con una utilización del 107,86 % frente al 95,20 % de la programación real, reflejando un uso más intensivo de los recursos, aunque con un ligero incremento en el tiempo extra.

Si se comparan estos resultados con los obtenidos en este TFG, el modelo base (también de naturaleza determinista) alcanza tasas de utilización aún más elevadas en la mayoría de los casos, con valores de eficiencia bruta superiores al 97 % y de eficiencia neta por encima del 86 %. No obstante, es importante señalar que estas cifras no son directamente comparables, ya que mientras el estudio de (Fei, et al., 2010) se valida con datos reales procedentes de más de 6000 registros quirúrgicos, en este trabajo se han empleado datos sintéticos generados a partir de distribuciones estadísticas. Además, las características estructurales de los entornos analizados son diferentes (número de quirófanos, cirujanos y pacientes en listas de espera), lo que condiciona enormemente los valores de utilización obtenidos.

Por otro lado, el estudio de (Addis, et al., 2016) se centra en minimizar una función de penalización basada en el tiempo de espera y la tardanza de los pacientes, incorporando al mismo tiempo indicadores como la tasa de utilización del quirófano y el tiempo de sobreuso. A nivel de decisión, selecciona qué pacientes de la lista de espera deben ser operados, asignándoles una fecha, mientras que la asignación detallada de quirófano y

hora queda en manos del personal hospitalario o de reglas sencillas. Metodológicamente, el problema se formula como un modelo de programación lineal entera mixta que se implementa en C++ y se resuelve usando el *solver* CPLEX. En cuanto a la incertidumbre, se han desarrollado tanto modelos deterministas como otros que consideran la incertidumbre en la duración de las cirugías. Para su validación, el modelo se ha probado con datos sintéticos, generados a partir de distribuciones obtenidas de registros quirúrgicos, considerando listas de espera de 80 y 120 pacientes.

En términos de resultados, los modelos deterministas alcanzaron tasas de utilización elevadas, entre 0.86 y 0.89 en el escenario de 80 pacientes y en torno a 0.78 - 0.83 para 120 pacientes. Sin embargo, al introducir robustez estocástica, la utilización disminuyó de forma significativa, situándose entre 0.74 - 0.80 (80 pacientes) y 0.68 - 0.71 (120 pacientes).

Si se comparan estos resultados con los obtenidos en este TFG, se observa que los valores de utilización logrados por los modelos deterministas de (Addis, et al., 2016) (entre 0,86 y 0,89 en el escenario de 80 pacientes, y entre 0,78 y 0,83 en el de 120) son inferiores a los alcanzados por el modelo base de este trabajo, que supera el 97 % de eficiencia bruta y el 86 % de eficiencia neta. En cuanto a los modelos que incorporan robustez estocástica, sus tasas de utilización (entre 0,74 y 0,80 para 80 pacientes y entre 0,68 y 0,71 para 120 pacientes) pueden ponerse en relación con el modelo alternativo 4 de este TFG. La diferencia fundamental radica en que en este trabajo el nivel de confianza con el que se controla el sobreuso puede configurarse, lo que permite generar planificaciones muy conservadoras, con eficiencias más bajas, pero con un riesgo mínimo de sobreutilización o, en el extremo contrario, obtener altos niveles de eficiencia a costa de un mayor porcentaje de sesiones con sobreuso. Este grado de flexibilidad constituye un valor añadido del modelo desarrollado, ya que dota al usuario de capacidad de decisión para equilibrar riesgo y eficiencia según las necesidades del hospital. No obstante, al igual que en el caso anterior, debe subrayarse que, aunque en ambos trabajos se han empleado datos sintéticos, los valores no son directamente comparables, puesto que las características estructurales de los bloques quirúrgicos considerados (número de quirófanos, cirujanos y pacientes en listas de espera) difieren de manera sustancial.

Asimismo, el trabajo de (Marques, et al., 2012) se centra en mejorar la utilización de los recursos quirúrgicos, con el objetivo principal de maximizar la ocupación de los quirófanos y reducir las listas de espera. A nivel de decisión, el modelo aborda la programación dentro de un horizonte semanal, asignando a cada paciente un quirófano, un día y un período de tiempo concreto. Metodológicamente, se formula como un modelo de programación lineal entera, resuelto también con el *solver* CPLEX. El enfoque es de

naturaleza determinista y se valida con datos reales de un hospital universitario de Lisboa, utilizando más de 21.000 registros quirúrgicos.

En términos de resultados, el estudio muestra una mejora muy significativa en la utilización de los quirófanos. La tasa de ocupación neta supera el 75 % y asciende al 96 % si se incluye el tiempo de rotación entre cirugías, alcanzando incluso valores cercanos al 99,7 % en algunas simulaciones.

Al comparar los resultados de (Marques, et al., 2012) con los obtenidos en este TFG, se aprecia que las tasas de ocupación neta reportadas en dicho estudio son ligeramente inferiores a las logradas por el modelo base de este trabajo, que supera de manera consistente el 97 % de eficiencia bruta y el 86 % de eficiencia neta. Además, estos valores pueden ponerse también en relación con el modelo alternativo 5, que es el que mayores tasas de ocupación obtiene dentro de este TFG, alcanzando cifras de eficiencia bruta superiores al 99 % y de eficiencia neta por encima del 91 %. En cualquier caso, debe insistirse en que estas comparaciones no son directas: mientras (Marques, et al., 2012) validan su propuesta con más de 21.000 registros quirúrgicos reales de un hospital universitario, en este trabajo se han utilizado datos sintéticos, y además las características estructurales del bloque quirúrgico considerado difieren de manera significativa.

En el caso concreto del HCUV, las entrevistas realizadas con el coordinador de quirófanos han permitido conocer algunos indicadores de su rendimiento actual. Según los profesionales consultados, la ocupación bruta real suele situarse en un rango del 60 % al 70 %, lo que pone de manifiesto un margen de mejora considerable en comparación con los valores alcanzados por los modelos desarrollados en este y otros trabajos. Por otro lado, el hospital ha establecido para 2025 un objetivo de cancelaciones no superior al 3,5 %, y los datos registrados en lo que va de año muestran resultados positivos, con tasas comprendidas entre el 2,4 % y el 3,1 %, lo que evidencia un control adecuado de este indicador por parte del hospital. No obstante, el problema de la sobreutilización sigue siendo un aspecto especialmente sensible en este centro: aunque actualmente el porcentaje de sesiones con sobreuso no sea elevado, ello se consigue a costa de programaciones muy conservadoras, en las que resulta difícil alcanzar valores elevados de utilización de los quirófanos.

Un aspecto fundamental de este TFG ha sido la generación de datos sintéticos para poder evaluar el rendimiento de los modelos desarrollados. En este sentido, resulta interesante analizar cómo se construyen estos conjuntos de prueba en otros trabajos y, en particular, qué distribuciones son las más empleadas para modelar la duración de las cirugías. En la literatura, con frecuencia se modela mediante distribuciones log-normal (Guinet & Chaabane, 2003) o uniforme (Lamiri, et al., 2008), aunque en algunos estudios se han empleado alternativas como la distribución PIII (Liu, et al., 2011). En cuanto a la

media de la duración, los valores más habituales oscilan entre 80 y 180 minutos, y se modelan tanto con valores fijos como con distribuciones uniformes (Molina-Pariente, et al., 2015). Por otro lado, la desviación estándar rara vez se fija de manera absoluta; lo más común es derivarla a partir de un coeficiente que introduce proporcionalidad respecto a la media (Marcon & Dexter, 2006). Este planteamiento permite capturar de forma más realista la variabilidad inherente al proceso quirúrgico, asegurando que los datos generados para las simulaciones reproduzcan adecuadamente la incertidumbre observada en entornos hospitalarios reales.

En el presente trabajo, la generación de datos sintéticos para la duración de las intervenciones quirúrgicas se ha basado en la distribución log-normal como modelo de referencia por su capacidad para reflejar la asimetría y dispersión de estos tiempos. En concreto, la duración estimada de cada intervención se ha generado aleatoriamente dentro de un rango uniforme entre 60 y 240 minutos, mientras que la desviación típica asociada se ha calculado como un porcentaje de la media seleccionada, con valores comprendidos entre el 10 % y el 50 %.

En resumen, la revisión realizada pone de manifiesto la gran diversidad existente en la literatura especializada sobre programación quirúrgica, tanto en lo relativo a los indicadores de rendimiento que se desean optimizar como a los niveles de decisión, metodologías, formas de tratar la incertidumbre o grados de aplicabilidad. Esta variedad hace que cada contribución se centre en un aspecto concreto del problema, de modo que no existan dos trabajos idénticos, sino enfoques complementarios que enriquecen el estado del arte. A pesar de estas diferencias, prácticamente todos los estudios coinciden en un punto común: los modelos de optimización desarrollados logran un rendimiento superior al obtenido con la programación manual que habitualmente llevan a cabo los hospitales, evidenciando así el potencial de estas herramientas para mejorar la gestión de los quirófanos. Finalmente, conviene señalar que una parte relevante de la literatura se centra principalmente en el análisis del rendimiento matemático y computacional de los modelos (como la velocidad de resolución o el número de óptimos locales alcanzados), sin entrar en detalle en el impacto organizativo. Dado que su propósito se aproxima más a un estudio puramente matemático, dichos trabajos no han sido objeto de análisis detallado en este apartado, al diferir de los objetivos perseguidos en este TFG.

8.3 Limitaciones

A lo largo de este trabajo se han desarrollado diversos modelos matemáticos con el objetivo de replicar y optimizar el proceso de programación quirúrgica en un entorno hospitalario. Aunque los resultados obtenidos han sido prometedores y permiten extraer

conclusiones relevantes, es importante destacar que toda modelización conlleva una serie de simplificaciones y supuestos que pueden afectar a su aplicabilidad directa en ciertos entornos reales. En este apartado se recogen las principales limitaciones detectadas en la aproximación, así como las implicaciones que pueden tener sobre la interpretación de los resultados.

Una primera limitación importante es que los modelos propuestos no asignan una hora concreta de inicio a cada intervención quirúrgica, sino que únicamente indican el día y el quirófano en el que debe realizarse. Es decir, la solución que ofrece el algoritmo consiste en un conjunto de intervenciones agrupadas por quirófano y día, pero sin establecer un cronograma detallado con horarios específicos. Para determinar el orden y la hora de comienzo de cada intervención es necesario incorporar una capa adicional de lógica que ordene las operaciones en función de criterios como la duración o la prioridad. A pesar de esta ausencia de horarios fijos, el modelo evita posibles solapamientos entre intervenciones asignadas a un mismo cirujano gracias a una restricción específica que garantiza que cada profesional solo puede operar en un único quirófano por día. De este modo, aunque no se indique la secuencia temporal exacta, se asegura la coherencia básica de la agenda y se evitan conflictos de disponibilidad entre quirófanos y personal quirúrgico.

Otra limitación relevante es el uso de datos sintéticos para la validación y evaluación de los modelos. En ausencia de una base de datos real, se ha recurrido a la generación de datos artificiales basados en distribuciones estadísticas ajustadas a la literatura existente. Aunque este enfoque es habitual en trabajos similares (Molina-Pariente, et al., 2015) y permite estudiar el comportamiento del modelo ante múltiples escenarios, la falta de datos clínicos reales impide evaluar su precisión en contextos específicos. Aun así, esta aproximación ha resultado útil para identificar tendencias y analizar el impacto de distintas variables como el horizonte temporal, el tiempo de rotación o la duración media de las intervenciones.

Asimismo, los modelos no incorporan explícitamente un sistema de priorización entre intervenciones quirúrgicas. En su lugar, se ha optado por una estrategia en la que cada intervención tiene una fecha límite establecida, que actúa como restricción para su programación, asegurando que ninguna se realice más tarde de dicha fecha. Esta simplificación permite garantizar que todas las operaciones se programen dentro del marco temporal clínicamente aceptable, pero no permite distinguir entre niveles de urgencia o prioridad relativa. La incorporación de una política explícita de priorización podría mejorar la adaptabilidad del modelo a situaciones en las que el criterio clínico de urgencia resulte determinante. Sin embargo, esta funcionalidad se ha dejado abierta a

futuras implementaciones, con el objetivo de que pueda adaptarse a las particularidades organizativas y asistenciales de cada hospital en concreto.

Otra limitación es la suposición de que los cirujanos y los quirófanos comparten la misma franja horaria de disponibilidad. Es decir, se asume que la jornada laboral de los profesionales quirúrgicos coincide completamente con el horario en el que los quirófanos están operativos. En la práctica, sin embargo, pueden existir diferencias entre los turnos del personal médico y la disponibilidad de las salas, lo que podría afectar a la viabilidad de determinadas asignaciones y requerir ajustes adicionales en la programación.

Por último, el modelo alternativo 4, orientado a controlar la probabilidad de sobrepasar el tiempo disponible en cada quirófano, se apoya en una serie de aproximaciones matemáticas para hacer viable su implementación computacional. Estas aproximaciones dan lugar a una cota más restrictiva que garantiza el cumplimiento de la restricción original, aunque a costa de cierta pérdida de precisión. A pesar de ello, como se ha comprobado en los resultados experimentales, esta aproximación permite controlar adecuadamente la probabilidad de sobreuso, siempre que se tenga en cuenta la correspondencia real entre el nivel de confianza establecido y el porcentaje observado de sesiones que exceden su capacidad.

Capítulo 9: Conclusiones y líneas futuras

9.1	Introducción.....	134
9.2	Cumplimiento de los objetivos propuestos.....	134
9.3	Aportaciones originales	135
9.4	Conclusiones.....	136
9.5	Líneas futuras	138

9.1 Introducción

El capítulo final de este trabajo se dedica a poner en perspectiva el trabajo realizado, revisando el grado en que se han alcanzado los objetivos propuestos y el valor de las aportaciones realizadas. A partir de los resultados obtenidos y del desarrollo completo del TFG, se formulan las principales conclusiones y se identifican las contribuciones más destacadas. Del mismo modo, se presentan posibles líneas futuras que permitan seguir avanzando en la herramienta propuesta, con el fin de acercarla progresivamente a un escenario de aplicación práctica dentro del ámbito hospitalario.

9.2 Cumplimiento de los objetivos propuestos

En este apartado se revisa el grado de cumplimiento de los objetivos propuestos en el primer el primer capítulo de este TFG y su contribución al desarrollo de la herramienta de apoyo a la programación quirúrgica:

- Se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica detallada del estado del arte en programación quirúrgica, lo que ha permitido identificar tanto las metodologías más utilizadas como las herramientas de gestión disponibles actualmente en el mercado. Además, se ha complementado con entrevistas realizadas a profesionales del HCUV, que han aportado una visión práctica y cercana de la realidad hospitalaria.
- Se ha formulado un modelo base del problema de programación quirúrgica, incorporando los elementos esenciales del sistema: quirófanos, cirujanos, duración estimada de las intervenciones y prioridades clínicas.
- A partir de este modelo inicial, se han desarrollado diversas variantes que introducen mayor realismo y exploran criterios adicionales de optimización, ampliando así las posibilidades de análisis y de aplicación práctica de las soluciones.
- Todos los modelos planteados han sido implementados y resueltos con el *solver* Gurobi, lo que ha permitido evaluar tanto su rendimiento computacional como la calidad de las soluciones obtenidas en términos de ocupación y cumplimiento de restricciones.
- Se han diseñado y ejecutado múltiples escenarios de simulación mediante la generación de datos sintéticos, lo que ha permitido validar los modelos propuestos a partir de indicadores clave como la eficiencia bruta y neta, el número de intervenciones programadas o el grado de sobreuso.

- Los resultados obtenidos han sido analizados y discutidos en detalle, contrastándolos con estudios previos publicados en la literatura. Este ejercicio ha permitido valorar la aportación del trabajo realizado y situarlo dentro del marco de referencia de otras propuestas existentes.

9.3 Aportaciones originales

Este trabajo ha dado lugar a una serie de contribuciones propias que aportan un valor añadido al proyecto. Estas aportaciones, fruto del enfoque aplicado, del contacto directo con profesionales sanitarios y de la integración de técnicas avanzadas de optimización, representan un avance relevante en el diseño de soluciones tecnológicas orientadas a mejorar la organización quirúrgica. Además, sientan las bases sobre las que se desarrollarán nuevas funcionalidades en el marco del TFM, suponiendo un punto de partida sólido para futuras líneas de investigación y desarrollo.

Una de las principales aportaciones del trabajo es la modelización matemática específica del proceso de programación quirúrgica, realizada a partir del conocimiento extraído de entrevistas y reuniones con profesionales del HCUV. Esta colaboración con el entorno sanitario real ha permitido identificar con precisión las restricciones clínicas y organizativas más relevantes, y trasladarlas de forma rigurosa al diseño del modelo. Como resultado, se ha logrado conceptualizar una herramienta técnica alineada con las necesidades reales del bloque quirúrgico, que no solo refleja el funcionamiento del sistema, sino que también tiene potencial de ser adoptada en la práctica clínica.

En este contexto se ha desarrollado un modelo base de optimización, así como cinco variantes adicionales que incorporan distintos aspectos del entorno quirúrgico, como la especialización de quirófanos, la limitación del número de quirófanos activos o el control estocástico del sobreuso. Estas variantes permiten adaptar el modelo a diferentes objetivos organizativos y contextos hospitalarios. A pesar de utilizar herramientas de optimización ya existentes (*i.e.*, *solver* Gurobi), su aplicación en este trabajo a un problema quirúrgico concreto, con restricciones inspiradas directamente en la práctica clínica, supone una aportación novedosa en un contexto poco explorado desde el ámbito ingenieril.

Otra contribución destacable es el uso de simulaciones para validar el comportamiento de los modelos desarrollados, mediante datos sintéticos generados a partir de distribuciones estadísticas utilizadas en la literatura especializada. Este enfoque ha permitido evaluar el rendimiento de cada modelo en función de parámetros como el horizonte temporal, la duración media de las intervenciones, el tiempo de limpieza entre cirugías o la probabilidad de exceder el horario previsto, extrayendo tendencias generales

y aportando una comprensión más profunda del funcionamiento de los algoritmos en distintos escenarios.

El trabajo también representa un ejemplo de enfoque interdisciplinar, al estar estrechamente vinculado con el TFG en ADE del autor. Mientras que en este TFG se ha abordado el diseño técnico y la validación del modelo de optimización, el trabajo en ADE se ha centrado en el análisis organizativo, la gestión del cambio y las estrategias de implantación en el entorno hospitalario. Esta doble aproximación, que combina conocimientos de ingeniería y gestión, no solo enriquece el análisis del problema, sino que amplía la viabilidad y el impacto potencial de la solución desarrollada.

Las aportaciones originales de este proyecto permiten avanzar en el desarrollo de soluciones tecnológicas aplicadas al ámbito sanitario, ofreciendo una herramienta basada en técnicas de optimización avanzadas, adaptable a distintos entornos hospitalarios, y concebida desde una lógica multidisciplinar que refuerza su utilidad real.

9.4 Conclusiones

Este trabajo se enmarca en el contexto de un proyecto de mayor alcance, que incluye también el TFG en el Grado en ADE y el TFM del Máster en Ingeniería de Telecomunicación del autor. Su desarrollo ha supuesto un importante esfuerzo multidisciplinar, en el que se ha contado con la colaboración de profesionales del HCUV. Este enfoque conjunto ha permitido abordar la problemática de la programación quirúrgica desde una doble perspectiva: técnica y organizativa, contribuyendo a definir una herramienta más útil y aplicable en el entorno hospitalario real.

La tecnología en el ámbito sanitario se ha asociado tradicionalmente con avances diagnósticos y terapéuticos. Sin embargo, también desempeña un papel clave en la mejora de procesos y en la eficiencia operativa de estructuras tan complejas como un bloque quirúrgico. En este contexto, desde el inicio del proyecto se ha tenido claro que el objetivo no era únicamente realizar un desarrollo académico, sino diseñar una herramienta funcional, capaz de ser utilizada en la práctica para mejorar la organización quirúrgica y facilitar el trabajo de los profesionales.

En lo que respecta a la herramienta desarrollada, varios aspectos merecen una mención especial. En primer lugar, el concepto general ha despertado un notable interés entre los profesionales encargados de la organización quirúrgica. Como se ha podido constatar durante el proceso de entrevistas detallado en el TFG del Grado en ADE del autor, esta programación se realiza actualmente de forma manual y sin apoyo de herramientas específicas, lo que supone una considerable inversión de tiempo y una mayor exposición a posibles errores, solapamientos o asignaciones ineficientes. La

solución propuesta permite automatizar este proceso, aliviando la carga administrativa del personal y mejorando los indicadores de rendimiento del bloque quirúrgico.

Gracias a la potencia de los algoritmos de optimización utilizados, es posible generar una propuesta inicial de agenda quirúrgica en apenas un minuto, alcanzando niveles de ocupación bruta superiores al 97 %. Esta combinación de rapidez y eficiencia convierte a la herramienta en una solución práctica, capaz de integrarse fácilmente en la operativa diaria del hospital y de ofrecer una programación quirúrgica optimizada sin necesidad de procesos manuales prolongados.

Entre los distintos modelos desarrollados, resulta especialmente destacable la incorporación de restricciones orientadas a minimizar el número de quirófanos utilizados. Esta funcionalidad permite concentrar la actividad en el menor número posible de quirófanos, al mismo tiempo que se maximiza el rendimiento conjunto del bloque. Esto conlleva una reducción significativa en costes humanos, energéticos y logísticos, y puede resultar especialmente útil en contextos con recursos limitados, presión presupuestaria y baja presión asistencial.

También merece atención la incorporación de restricciones estocásticas que permiten controlar la probabilidad de que una jornada quirúrgica supere el tiempo disponible del quirófano. Este tipo de planteamiento, poco habitual en herramientas similares, permite manejar de forma explícita la incertidumbre asociada a la duración real de las intervenciones. Si bien su aplicación puede no ser prioritaria en todos los entornos, sí representa un valor añadido en aquellos hospitales que muestran una alta sensibilidad ante posibles prolongaciones de jornada.

Aunque el desarrollo del proyecto no ha contado con una base de datos clínica real, la utilización de datos sintéticos generados a partir de distribuciones estadísticas bien documentadas en la literatura ha permitido analizar el comportamiento de los modelos con rigor. Esto ha resultado clave para estudiar el impacto de múltiples factores, como la variación del horizonte temporal, el tiempo de rotación entre intervenciones o la duración media de las cirugías, y extraer conclusiones generalizables sobre la robustez del enfoque propuesto.

Por último, la incorporación de un módulo de localización supone un paso adelante en la digitalización del bloque quirúrgico. Este componente, concebido para futuras fases del proyecto, permitiría obtener información en tiempo real sobre la ubicación de pacientes y profesionales, registrar automáticamente la duración de las intervenciones y mejorar la asignación dinámica de recursos. Todo ello contribuiría a un entorno más ágil, eficiente y orientado a la toma de decisiones basada en datos.

9.5 Líneas futuras

Como se ha mencionado anteriormente, este trabajo forma parte de un proyecto de mayor alcance, que incluye también el TFM del Máster en Ingeniería de Telecomunicación del autor. En este sentido, las líneas futuras que se presentan a continuación no se conciben como simples sugerencias para posibles mejoras, sino como los pilares concretos sobre los que se desarrollará la siguiente fase del proyecto. Todas ellas están ya conceptualizadas dentro de la arquitectura general de la herramienta, y su desarrollo permitirá avanzar hacia una solución más completa, robusta y alineada con las necesidades reales del entorno hospitalario.

Hasta el momento, el trabajo se ha centrado principalmente en la conceptualización de la herramienta, la recogida de información procedente de entrevistas con profesionales del ámbito quirúrgico, la modelización matemática del problema de programación quirúrgica y la validación de distintos modelos mediante simulaciones en diversos escenarios. Si bien estos elementos han permitido establecer una base sólida, es necesario avanzar en nuevas funcionalidades que permitan la implantación práctica de la herramienta en un entorno hospitalario real.

Una de las principales líneas de desarrollo para el TFM será la mejora de la interfaz gráfica de usuario para facilitar la interacción con el sistema. Aunque este aspecto no afecta directamente al rendimiento del algoritmo desde el punto de vista de la optimización, sí resulta determinante para su adopción efectiva. Una interfaz visualmente accesible, clara e intuitiva permitirá a los usuarios utilizar la herramienta sin necesidad de formación técnica avanzada, reduciendo la curva de aprendizaje y fomentando su integración en la dinámica operativa diaria. En este trabajo se ha desarrollado ya una interfaz gráfica preliminar que permite visualizar los cronogramas quirúrgicos generados por el modelo, pero se trata de una versión básica. La herramienta definitiva deberá incorporar funcionalidades adicionales para que pueda ser utilizada de forma completa y operativa en el entorno hospitalario.

Otro de los pilares fundamentales del TFM será el desarrollo de un modelo de reacción ante imprevistos, capaz de adaptar automáticamente la agenda quirúrgica cuando se produzcan alteraciones inesperadas, como cancelaciones de última hora o variaciones en la duración de las intervenciones. El objetivo de este modelo será minimizar el impacto de estos imprevistos sobre el resto de la agenda quirúrgica. Para ello, se planteará un nuevo modelo de optimización, basado en los ya desarrollados, pero que incorporará restricciones específicas orientadas a reducir al máximo la desviación entre la programación original y la reprogramación generada tras los cambios, asegurando así una mayor estabilidad y continuidad en la programación diaria.

Para dotar a la herramienta de capacidad real de adaptación ante imprevistos, es necesario incluir un módulo de localización en tiempo real. Actualmente, cualquier alteración en la duración de una intervención requiere la intervención manual de los responsables del bloque, lo que limita la flexibilidad del sistema. La integración de un sistema de monitorización en tiempo real permitiría a la herramienta detectar automáticamente cuándo una cirugía comienza y finaliza, ajustando la programación del resto de la jornada sin necesidad de intervención externa. Para ello, se plantea la implementación de un sistema de posicionamiento en interiores basado en balizas y antenas receptoras, que permita determinar con alta precisión la ubicación de pacientes, personal y equipamiento quirúrgico. Esta funcionalidad no solo permitiría automatizar el registro de los tiempos quirúrgicos reales, sino también facilitar la localización de material médico en el bloque quirúrgico, reduciendo tiempos de búsqueda y mejorando la eficiencia global.

Asimismo, se prevé incorporar un módulo de predicción de duración quirúrgica basado en técnicas de *machine learning* o *deep learning*. Como se ha evidenciado a lo largo del proyecto, la duración de las intervenciones es uno de los factores que mayor impacto tiene en la eficiencia del bloque quirúrgico. Por tanto, disponer de un modelo que permita estimar de forma más precisa los tiempos quirúrgicos en función de variables como el tipo de cirugía, el paciente, el cirujano o la complejidad esperada, contribuiría a generar programaciones más realistas y ajustadas a la operativa real.

Finalmente, para continuar avanzando en la validación de los modelos y garantizar su aplicabilidad práctica, sería deseable contar con una base de datos real procedente de un hospital. Aunque el uso de datos sintéticos ha resultado útil para observar el comportamiento general de los modelos y explorar múltiples escenarios, disponer de datos reales permitiría ajustar mejor los parámetros del sistema, detectar posibles desviaciones y refinar el modelo para adaptarlo aún más a las particularidades del entorno hospitalario al que se desee aplicar.

Bibliografía

- Abdalkareem, Z. A., Amir, A., Al-Betar, M. A., Ekhan, P., & Hammouri, A. I. (2021). Healthcare scheduling in optimization context: a review. *Health and Technology*, 11(3), 445-469.
- Abramovich, S., Jameson, G., & Sinnamon, G. (2004). Refining Jensen's inequality. *Bulletin Mathématique de la Société des Sciences Mathématiques de Roumanie*, 3-14.
- Adan, I. J., & Vissers, J. M. (2002). Patient mix optimisation in hospital admission planning: a case study. *International Journal of Operations & Production Management*, 22(4), 445-461.
- Addis, B., Carello, G., Grosso, A., & Tànfani, E. (2016). Operating room scheduling and rescheduling: a rolling horizon approach. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 28(1), 206-232.
- Albareda, J., Clavel, D., Mahulea, C., Blanco, N., Ezquerra, L., Gómez, J., & Silva, J. M. (2017). ¿Realizamos bien la programación quirúrgica? ¿Cómo podemos mejorarla? *Revista Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología*, 61(6), 375-382.
- Amaran, S., Sahinidis, N. V., Sharda, B., & Bury, S. J. (2016). Simulation optimization: a review of algorithms and applications. *Annals of Operations Research*, 240(1), 351-380.
- Anand, R., Aggarwal, D., & Kumar, V. (2017). A comparative analysis of optimization solvers. *Journal of Statistics and Management Systems*, 20(4), 623-635.
- Andradóttir, S. (1998). A review of simulation optimization techniques. *1998 Proceedings of the Winter Simulation Conference* (págs. 151-158). IEEE.
- Arenas, M., Bilbao, A., Caballero, R., Gómez, T., Rodríguez, M. V., & Ruiz, F. (2002). Analysis via goal programming of the minimum achievable stay in surgical waiting lists. *Journal of the Operational Research society*, 53(4), 387-396.
- Bahía, C. (2025). *Cirus Bahía. Gestión inteligente del proceso quirúrgico*. Recuperado el 20 de Julio de 2025, de <https://cirus.es/#que-es>
- Basson, M. D., & Butler, T. (2006). Evaluation of operating room suite efficiency in the Veterans Health Administration system by using data-envelopment analysis. *The American journal of surgery*, 192(5), 649-656.

- Baumgart, A., Zoeller, A., Denz, C., Bender, H. J., Heinzl, A., & Badreddin, E. (2007). Using computer simulation in operating room management: impacts on process engineering and performance. *2007 40th Annual Hawaii International Conference on System Sciences* (págs. 131-131). IEEE.
- Beliën, J., Demeulemeester, E., & Cardoen, B. (2006). Visualizing the demand for various resources as a function of the master surgery schedule: A case study. *Journal of Medical Systems*, 30(5), 343-350.
- Bellini, V., Ruso, M., Domenichetti, T., Panizzi, M., Allai, S., & Bignami, E. G. (2025). *Inteligencia artificial en la gestión de quirófanos*. Recuperado el 21 de Julio de 2025, de <https://saludbydiaz.com/2024/07/26/inteligencia-artificial-en-la-gestion-de-quiroyfanos/>
- Blake, J. T., Dexter, F., & Donald, J. (2002). Operating room managers' use of integer programming for assigning block time to surgical groups: a case study. *Anesthesia & Analgesia*, 94(1), 143-148.
- Blum, C., & Roli, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys*, 35(3), 268-308.
- Calafiore, G. C., & El Ghaoui, L. (2014). *Optimization models*. Cambridge University Press.
- Cardoen, B., Demeulemeester, E., & Beliën, J. (2009). Optimizing a multiple objective surgical case sequencing problem. *International Journal of Production Economics*, 119(2), 354-366.
- Cardoen, B., Demeulemeester, E., & Beliën, J. (2010). Operating room planning and scheduling: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 201(3), 921-932.
- Cedr s, R. C. (2024). Gestión de listas de espera en la atención sanitaria: desafíos y soluciones. *Revista médica Ocronos*(11), 66. Obtenido de <https://revistamedica.com/gestion-listas-espera-atencion-sanitaria-soluciones/#Impacto-en-los-pacientes-y-el-sistema-sanitario>
- Chaabane, S., Meskens, N., Guinet, A., & Laurent, M. (2006). Comparison of two methods of operating theatre planning: application in Belgian hospital. *2006 International conference on service systems and service management* (p ags. 386-392). IEEE.
- Comisión Nacional de Evaluación y Productividad . (2020). *Eficiencia en Pabellones y priorización de pacientes para cirugía electiva*. Santiago de Chile.

- Denton, B. T., Rahman, A. S., Nelson, H., & Bailey, A. C. (2006). Simulation of a multiple operating room surgical suite. 2006 *Proceedings of the Winter Simulation Conference* (págs. 414-424). IEEE.
- Denton, B., Viapiano, J., & Vogl, A. (2007). Optimization of surgery sequencing and scheduling decisions under uncertainty. *Health Care Management Science*, 10(1), 13-24.
- Dexter, F., & Epstein, R. H. (2005). Operating room efficiency and scheduling. *Current Opinion in Anesthesiology*, 18(2), 195-198.
- Divatia, J. V., & Ranganathan, P. (2015). Can we improve operating room efficiency? *Journal of Postgraduate Medicine*, 61(1), 1-2.
- Erdogan, S. A., Denton, B. T., Cochran, J. J., Cox, L., Keskinocak, P., Kharoufeh, J., & Smith, J. (2011). Surgery planning and scheduling. En *Wiley Encyclopedia of operations research and management science*. Hoboken, NJ, USA: Wiley.
- Fairley, M., Scheinker, D., & Brandeau, M. L. (2019). Improving the efficiency of the operating room environment with an optimization and machine learning model. *Health Care Management Science*, 22(4), 756-767.
- Fei, H., Meskens, N., & Chu, C. (2010). A planning and scheduling problem for an operating theatre using an open scheduling strategy. *Computers & Industrial Engineering*, 58(2), 221-230.
- Figueira, G., & Almada-Lobo, B. (2014). Hybrid simulation–optimization methods: A taxonomy and discussion. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 46, 118-134.
- Fong, A. J., Smith, M., & Langerman, A. (2016). Efficiency improvement in the operating room. *Journal of Surgical Research*, 204(2), 371-383.
- Fouskakis, D., & Draper, D. (2002). Stochastic optimization: a review. *International Statistical Review*, 70(3), 315-349.
- Gancedo, C. H. (2022). Gestión del área quirúrgica hospitalaria. Perspectivas directiva y asistencial. *Revista de Gobierno Administración y Políticas de Salud*, 1, 6.
- Gavish, B., & Graves, S. C. (1978). *The travelling salesman problem and related problems*. Massachusetts Institute of Technology. Operations Research Center.
- Getinge. (2025). *Gestión de quirófanos Torin*. Recuperado el 20 de Julio de 2025, de [www.getinge.com: https://www.getinge.com/lat/productos/torin/](https://www.getinge.com/lat/productos/torin/)

- Gladish, B. P., Parra, M. A., Terol, A. B., & Uría, M. V. (2005). Management of surgical waiting lists through a possibilistic linear multiobjective programming problem. *Applied Mathematics and Computation*, 167(1), 477-495.
- Gomes, C., Almada-Lobo, B., Borges, J., & Soares, C. (2012). Integrating data mining and optimization techniques on surgery scheduling. *International conference on advanced data mining and applications*, 589-602.
- Gómez-Ríos, M. A., Abad-Gurumeta, A., Casans-Francés, R., & Calvo-Vecino, J. M. (2019). Claves para optimizar la eficiencia de un bloque quirúrgico. *Revista Española de Anestesiología y Reanimación*, 66(2), 104-112.
- Guinet, A., & Chaabane, S. (2003). Operating theatre planning. *International Journal of Production Economics*, 85(1), 69-81.
- Gupta, D. (2007). Surgical suites' operations management. *Production and Operations Management*, 16(6), 689-700.
- Gurobi. (2025). *Gurobi Optimization*. Recuperado el 23 de Julio de 2025, de <https://www.gurobi.com/>
- Hans, E., Wullink, G., Van Houdenhoven, M., & Kazemier, G. (2008). Robust surgery loading. *European Journal of Operational Research*, 185(3), 1038-1050.
- Harders, M., Malangoni, M. A., Weight, S., & Sidhu, T. (2006). Improving operating room efficiency through process redesign. *Surgery*, 140(4), 509-516.
- Hochba, D. S. (1997). Approximation algorithms for NP-hard problems. *ACM Sigact News*, 28(2), 40-52.
- Hospital Clínic de Barcelona. (2025). *Área Quirúrgica*. Recuperado el 24 de Julio de 2025, de <https://www.clinicbarcelona.org/instituto/area-quirurgica>
- IBM. (2025). *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*. Recuperado el 23 de Julio de 2025, de <https://www.ibm.com/es-es/products/ilog-cplex-optimization-studio>
- Jebali, A., Alouane, A. B., & Ladet, P. (2006). Operating rooms scheduling. *International Journal of Production Economics*, 99(1-2), 52-62.
- Jourdan, L., Basseur, M., & Talbi, E. G. (2009). Hybridizing exact methods and metaheuristics: A taxonomy. *European Journal of Operational Research*, 199(3), 620-629.
- Kall, P. (1986). Approximation to optimization problems: An elementary review. *Mathematics of Operations Research*, 11(1), 9-18.

- Kharraja, S., Albert, P., & Chaabane, S. (2006). Block scheduling: Toward a master surgical schedule. *2006 International conference on service systems and service management* (págs. 429-435). IEEE.
- Kochenberger, G. A., Glover, F., Alidaee, B., & Rego, C. (2004). A unified modeling and solution framework for combinatorial optimization problems. *Or Spectrum*, 26(2), 237-250.
- Kopach, R., DeLaurentis, P. C., Lawley, M., Muthuraman, K., Ozsen, L., Rardin, R., & Willis, D. (2007). Effects of clinical characteristics on successful open access scheduling. *Health Care Management Science*, 10(2), 111-124.
- Kuo, P. C., Schroeder, R. A., Mahaffey, S., & Bollinger, R. R. (2003). Optimization of operating room allocation using linear programming techniques. *Journal of the American College of Surgeons*, 197(6), 889-895.
- Kwak, S. G., & Kim, J. H. (2017). Central limit theorem: the cornerstone of modern statistics. *Korean Journal of Anesthesiology*, 70(2), 144.
- Lamiri, M., Xie, X., Dolgui, A., & Grimaud, F. (2008). A stochastic model for operating room planning with elective and emergency demand for surgery. *European Journal of Operational Research*, 185(3), 1026-1037.
- Landa, P., Aringhieri, R., Soriano, P., Tànfani, E., & Testi, A. (2016). A hybrid optimization algorithm for surgeries scheduling. *Operations Research for Health Care*, 8, 103-114.
- Lee, D. J., Ding, J., & Guzzo, T. J. (2019). Improving operating room efficiency. *Current Urology Reports*, 20(6), 28.
- Liu, Y., Chu, C., & Wang, K. (2011). A new heuristic algorithm for the operating room scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, 61(3), 865-871.
- Lu, Q., Zhu, X., Wei, D., Bai, K., Gao, J., & Zhang, R. (2019). Multi-phase and integrated multi-objective cyclic operating room scheduling based on an improved NSGA-II approach. *Symmetry*, 11(5), 599.
- Magerlein, J. M., & Martin, J. B. (1978). Surgical demand scheduling: a review. *Health Services Research*, 13(4), 418.
- Manne, A. S. (1960). On the job-shop scheduling problem. *Operations Research*, 8(2), 219-223.
- Marcon, E., & Dexter, F. (2006). Impact of surgical sequencing on post anesthesia care unit staffing. *Health Care Management Science*, 9(1), 87-98.

- Marques, I., Captivo, M. E., & Vaz Pato, M. (2012). An integer programming approach to elective surgery scheduling: Analysis and comparison based on a real case. *OR Spectrum*, 34(2), 407-427.
- Marti, K. (2015). *Stochastic optimization methods*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg.
- Martí, R., & Reinelt, G. (2022). Exact and heuristic methods in combinatorial optimization: A study on the linear ordering and the maximum diversity problem. En *Heuristic methods*. (págs. 27-57). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- May, J. H., Spangler, W. E., & Strum, D. P. (2011). The surgical scheduling problem: Current research and future opportunities. *Production and Operations Management*, 20(3), 392-405.
- Meindl, B., & Templ, M. (2012). Analysis of commercial and free and open source solvers for linear optimization problems. *Eurostat and Statistics Netherlands within the project ESSnet on common tools and harmonised methodology for SDC in the ESS*, 20, 64-77.
- Min, D., & Yih, Y. (2010). An elective surgery scheduling problem considering patient priority. *Computers & Operations Research*, 37(6), 1091-1099.
- Ministerio de Sanidad. (2022). *Registro de Actividad de Atención Sanitaria Especializada (RAE-CMBD): Actividad y resultados de la hospitalización en el SNS*. Madrid.
- Ministerio de Sanidad y Política Social. (2009). *Bloque Quirúrgico. Estándares y recomendaciones*. España.
- Molina-Pariente, J. M., Hans, E. W., Framinan, J. M., & Gomez-Cia, T. (2015). New heuristics for planning operating rooms. *Computers & Industrial Engineering*, 90, 429-443.
- Nieto Medina, Á. (2021). *Trabajo de Fin de Grado: Integración de planificación de intervenciones en quirófanos y camas postoperatorias*. Sevilla: Escuela Técnica de Ingeniería (Universidad de Sevilla).
- Onwubolu, G. C., & Babu, B. V. (2013). *New optimization techniques in engineering* (Vol. 141). Springer.
- Ouelhadj, D., & Petrovic, S. (2009). A survey of dynamic scheduling in manufacturing systems. *Journal of Scheduling*, 12, 417-431.

- Overdyk, F. J., Harvey, S. C., Fishman, R. L., & Shippey, F. (1998). Successful strategies for improving operating room efficiency at academic institutions. *Anesthesia & Analgesia*, 86(4), 896-906.
- Ozkarahan, I. (2000). Allocation of surgeries to operating rooms by goal programming. *Journal of Medical Systems*, 24(6), 339-378.
- Pariante, J. M., Torres, J. M., Rodríguez, P. L., & Pineda, J. L. (2009). Planificación quirúrgica: revisión de la literatura. *XIII Congreso de Ingeniería de Organización*, 1346-1355.
- Persson, M., & Persson, J. A. (2009). Health economic modeling to support surgery management at a Swedish hospital. *Omega*, 37(4), 853-863.
- Pham, D. N., & Klinkert, A. (2008). Surgical case scheduling as a generalized job shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 185(3), 1011-1025.
- Powell, W. B. (2019). A unified framework for stochastic optimization. *European Journal of Operational Research*, 275(3), 795-821.
- Ramírez, J. P. (2015). El coste de un quirófano sigue en aumento y llega a los 15 euros por minuto. *Gaceta Médica*, págs. -. Obtenido de https://gacetamedica.com/hemeroteca/el-coste-de-un-quirofano-sigue-en-aumento-y-llega-a-los-15-euros-por-minuto-iulg_951009/
- Ramos, A., Sánchez, P., Ferrer, J. M., Barquín, J., & Linares, P. (2010). *Modelos matemáticos de optimización* (Vol. 1 ed.). Madrid: Publicación Técnica.
- Renders, J. M., & Flasse, S. P. (1996). Hybrid methods using genetic algorithms for global optimization. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 26(2), 243-258.
- Riahi, V., Hassanzadeh, H., Khanna, S., Boyle, J., Syed, F., Biki, B., & Sweeney, L. (2023). Improving preoperative prediction of surgery duration. *BMC Health Services Research*, 23(1), 1343.
- Roberts, J. E., & Thomas, J. M. (1991). Mixed and hybrid methods. En P. G. Ciarlet, & J. L. Lions, *Handbook of Numerical Analysis* (págs. 523-639). Gulf Professional Publishing.
- Romero García, E., Lacruz, P., Checa Barambio, C., Alfaro Rubio, A., Dapena Ortiz, D., Rollán García, P., & Gil Suay, V. (2015). El poder de la planificación del bloque quirúrgico. *Gestión y Evaluación de Costes Sanitarios*, 16(1), 75-92.

- Rothstein, D. H., & Raval, M. V. (2018). Operating room efficiency. *Seminars in Pediatric Surgery*, 27(2), 79-85.
- Sahab, M. G., Toropov, V. V., & Gandomi, A. H. (2013). A review on traditional and modern structural optimization: problems and techniques. En *Metaheuristic applications in structures and infrastructures* (págs. 25-47).
- Salkin, H. M., & De Kluyver, C. A. (1975). The knapsack problem: a survey. *Naval Research Logistics Quarterly*, 22(1), 127-144.
- Samudra, M., Van Riet, C., Demeulemeester, E., Cardoen, B., Vansteenkiste, N., & Rademakers, F. E. (2016). Scheduling operating rooms: achievements, challenges and pitfalls. *Journal of Scheduling*, 19(5), 493-525.
- Samudra, M., Van Riet, C., Demeulemeester, E., Cardoen, B., Vansteenkiste, N., & Rademakers, F. E. (2016). Scheduling operating rooms: achievements, challenges and pitfalls. *Journal of Scheduling*, 19(5), 493-525.
- Secretaría General de Salud Digital, Información e Innovación del Sistema Nacional de Salud (2023). *Indicadores hospitalarios. Evolución 2012-2021*. Madrid: Ministerio de Sanidad .
- Serra Sutton, V., Solans Domènech, M., & Espallargues Carreras, M. (2011). *Eficiencia en la utilización de los bloques quirúrgicos. Definición de indicadores*. Ministerio de Ciencia e Innovación.
- Sistema Nacional de Salud (2024). www.epdata.es. Obtenido de <https://www.epdata.es/datos/listas-espera-sanidad-publica/24/espana/106>
- Suresh, V., & Chaudhuri, D. (1993). Dynamic scheduling—a survey of research. *International Journal of Production Economics*, 32(1), 53-63.
- Tuwatananurak, J. P., Zadeh, S., Xu, X., Vacanti, J. A., Fulton, W. R., Ehrenfeld, J. M., & Urman, R. D. (2019). Machine learning can improve estimation of surgical case duration: a pilot study. *Journal of Medical Systems*, 43(3), 44.
- Uribe-Gómez, J. A., & Barrientos-Gómez, J. G. (2022). Análisis de indicadores de gestión del servicio de cirugía en una institución de salud de alta complejidad. *Revista CEA*, 8(16).
- Van Houdenhoven, M., Hans, E. W., Klein, J., Wullink, G., & Kazemier, G. (2007). A norm utilisation for scarce hospital resources: evidence from operating rooms in a Dutch university hospital. *Journal of Medical Systems*, 31(4), 231-236.

- Van Oostrum, J. M., Van Houdenhoven, M., Hurink, J. L., Hans, E. W., Wullink, G., & Kazemier, G. (2008). A master surgical scheduling approach for cyclic scheduling in operating room departments. *OR Spectrum*, 30(2), 355-374.
- Vilcarromero Ruiz, R. (2017). *La gestión de la producción*. Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso.
- Vitoriano, B., & Ramos, A. (2023). *Programación Matemática: Métodos de optimización*. Universidad Complutense de Madrid.
- Zhang, Z., Xie, X., & Geng, N. (2013). Dynamic surgery assignment of multiple operating rooms with planned surgeon arrival times. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 11(3), 680-691.
- Zhu, S., Fan, W., Yang, S., Pei, J., & Pardalos, P. M. (2019). Operating room planning and surgical case scheduling: a review of literature. *Journal of Combinatorial Optimization*, 37(3), 757-805.