

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería de Tecnologías Industriales

Desarrollo de modelos de programación lineal para la gestión de personal en el ámbito sanitario

Autor: José Ángel Rincón Pérez

Tutor: José Manuel Molina Pariente

**Dpto. de Organización Industrial y Gestión de
Empresas I**

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2023



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de Tecnologías Industriales

Desarrollo de modelos de programación lineal para la gestión de personal en el ámbito sanitario

Autor:

José Ángel Rincón Pérez

Tutor:

José Manuel Molina Pariente

Profesor ayudante doctor

Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023

Trabajo Fin de Grado: Desarrollo de modelos de programación lineal para la gestión de personal en el ámbito sanitario

Autor: José Ángel Rincón Pérez

Tutor: José Manuel Molina Pariente

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

Agradecer inmensamente a mis padres.

Su amor incondicional, apoyo constante y sacrificios innumerables lo han sido todo en estos cuatro años de carrera. Su inquebrantable fe en mí me ha impulsado a alcanzar mis metas. Este logro no habría sido posible sin su amor, aliento y respaldo inquebrantables. Gracias por estar siempre a mi lado.

Agradecer igualmente a Sara, por su compañía, alegría, vitalidad y positividad.

A mi tutor, José Manuel, por ayudarme en todo momento.

A la Escuela, gracias por todo.

José Ángel Rincón Pérez

Sevilla, 2023

Resumen

El presente Trabajo Fin de Grado aborda el desafío crítico surgido entre la creciente demanda de atención médica y los recursos limitados con los que cuentan los sistemas de salud. Se enfoca en la planificación del proceso de Atención Hospitalaria Médico-Quirúrgica como solución a este problema sanitario mediante la creación de dos modelos de programación lineal para la gestión del personal médico y la atención de los pacientes. El primero, planifica la actividad asistencial anual de los cirujanos para cada semana, sin considerar vacaciones, formaciones ni permisos. El segundo, aumenta esta visión añadiendo los factores mencionados.

La implementación y validación de los modelos en el lenguaje de programación Python consolida el carácter preciso y certero de los modelos desarrollados, asegurando su aplicabilidad en múltiples casos y escenarios.

Índice

Agradecimientos	iv
Resumen	v
Índice	vi
Índice de tablas	vii
Índice de ilustraciones	viii
1 Introducción	1
1.1 <i>Presentación</i>	1
1.2 <i>Objetivos</i>	1
1.3 <i>Sumario</i>	2
2 Descripción del problema	3
2.1 <i>Problema sanitario</i>	3
2.2 <i>Gestión de los recursos humanos en el ámbito hospitalario</i>	4
3 Enfoque, ámbito de aplicación y aspectos particulares del problema	6
3.1 <i>Enfoque y ámbito de aplicación del problema</i>	6
3.2 <i>Aspectos particulares del problema</i>	6
4 Metodología de resolución	9
4.1 <i>Posibles métodos de resolución</i>	9
4.2 <i>Método de resolución adoptado</i>	9
5 Modelado del problema	11
5.1 <i>Modelo básico de planificación asistencial</i>	11
5.2 <i>Modelo integral de planificación asistencial y gestión del personal</i>	18
6 Generación de instancias: factores, conjuntos y parámetros	25
6.1 <i>Definición de factores</i>	25
6.2 <i>Definición de conjuntos</i>	26
6.3 <i>Definición de parámetros</i>	26
7 Experimentación	35
7.1 <i>Implementación del modelo</i>	35
7.2 <i>Casos estudiados</i>	36
7.3 <i>Soluciones generadas</i>	37
7.4 <i>Análisis de los resultados obtenidos</i>	39
7.4.1 <i>Análisis entre modelos básico e integral</i>	39
7.4.2 <i>Análisis entre soluciones del modelo integral</i>	44
8 Futuras líneas de investigación	48
9 Conclusiones	49
Bibliografía	50
Anexos	53
<i>Anexo A. Resultados obtenidos y análisis de datos</i>	53
<i>Anexo B. Código Python desarrollado</i>	60

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 - Semanas mínimas de espera y máximas de respuesta entre etapas</i>	7
<i>Tabla 2 - Semanas mínimas de espera y máximas de respuesta entre etapas</i>	7
<i>Tabla 3 - Conjuntos del modelo básico de planificación asistencial</i>	11
<i>Tabla 4 - Parámetros del modelo básico de planificación asistencial</i>	12
<i>Tabla 5 - Variables del modelo básico de planificación asistencial</i>	12
<i>Tabla 6 - Ejemplo de agregación de las variables desagregadas</i>	16
<i>Tabla 7 - Conjuntos del modelo integral de planificación asistencial y gestión del personal</i>	18
<i>Tabla 8 - Parámetros del modelo integral de planificación asistencial y gestión del personal</i>	19
<i>Tabla 9 - Nuevos parámetros necesarios para el modelo integral de planificación asistencial y gestión del personal</i>	19
<i>Tabla 10 - Variables del modelo integral de planificación asistencial y gestión del personal</i>	20
<i>Tabla 11 - Factores utilizados para la generación de conjuntos y parámetros de los modelos</i>	25
<i>Tabla 12 - Valores de α y β</i>	25
<i>Tabla 13 - Ejemplo de planificación ideal de la demanda y listas de espera iniciales</i>	28
<i>Tabla 14 - Cirujanos mínimos requeridos, disponibles y máximos posibles ausentes al mismo tiempo</i>	31
<i>Tabla 15 - Valores de los coeficientes de ponderación para cada modelo</i>	34
<i>Tabla 16 - Resumen de casos estudiados</i>	36
<i>Tabla 17 - Tamaño de los problemas considerados</i>	36
<i>Tabla 18 - Ejemplo de una solución genérica alcanzada</i>	37
<i>Tabla 19 - Ejemplo de planificación alcanzada para una semana genérica</i>	38
<i>Tabla 20 - Resumen de las soluciones alcanzadas 1</i>	53
<i>Tabla 21 - Resumen de las soluciones alcanzadas 2</i>	54
<i>Tabla 22 - Resumen para la comparación entre modelos</i>	55
<i>Tabla 23 - Resumen para la comparación entre soluciones del modelo integral</i>	55
<i>Tabla 24 - Planificación promedio de las cinco semillas para el escenario 1 con $\beta = 150\%$</i>	56
<i>Tabla 25- Planificación promedio de las cinco semillas para el escenario 1 con $\beta = 200\%$</i>	57
<i>Tabla 26- Planificación promedio de las cinco semillas para el escenario 2 con $\beta = 150\%$</i>	58
<i>Tabla 27- Planificación promedio de las cinco semillas para el escenario 2 con $\beta = 200\%$</i>	59

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1 - Comparación del porcentaje de uso de los recursos según el modelo básico e integral</i>	39
<i>Ilustración 2 - Pacientes atendidos y no atendidos según ambos modelos para el escenario 1</i>	40
<i>Ilustración 3 - Paciente atendidos y no atendidos según ambos modelos para el escenario 2</i>	40
<i>Ilustración 4 - Planificaciones alcanzadas para el escenario 1 con ambos modelos para $\beta = 150\%$</i>	40
<i>Ilustración 5 - Planificaciones alcanzadas para el escenario 1 con ambos modelos para $\beta = 200\%$</i>	41
<i>Ilustración 6- Planificaciones alcanzadas para el escenario 2 con ambos modelos para $\beta = 150\%$</i>	41
<i>Ilustración 7 - Planificaciones alcanzadas para el escenario 2 con ambos modelos para $\beta = 200\%$</i>	42
<i>Ilustración 8 - Soluciones óptimas y factibles alcanzadas por ambos modelos</i>	42
<i>Ilustración 9 - Valores de las funciones objetivos y tiempos de ejecución para ambos modelos</i>	43
<i>Ilustración 10 - Atención de las listas de espera según ambos modelos</i>	43
<i>Ilustración 11 - Aumento del grado de satisfacción de los cirujanos</i>	44
<i>Ilustración 12 - Pacientes atendidos por etapas en función del exceso de disponibilidad de recursos humanos</i>	44
<i>Ilustración 13 - Comparación del porcentaje de uso de los recursos</i>	45
<i>Ilustración 14 - Pacientes no atendidos en la etapa quirúrgica y su atraso medio para el escenario 1</i>	45
<i>Ilustración 15 - Pacientes no atendidos en la etapa quirúrgica y su atraso medio para el escenario 2</i>	45
<i>Ilustración 16 - Comparación del porcentaje de uso de los recursos físicos al aumentar el nivel de demanda</i>	46
<i>Ilustración 17 - Resumen de la atención para el escenario 1</i>	46
<i>Ilustración 18 - Resumen de la atención para el escenario 2</i>	47

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Presentación

En la encrucijada entre la creciente demanda de atención médica y los recursos limitados en los sistemas de salud, surge un desafío crítico que afecta directamente a la calidad de vida de los pacientes y al bienestar de los profesionales de la salud. En un mundo donde la salud es un valor supremo, la planificación eficiente se erige como un componente esencial para asegurar que los pacientes reciban la atención adecuada en el momento adecuado.

Imaginar un escenario en el cual los pacientes no se vean forzados a esperar largos períodos para recibir tratamiento médico o quirúrgico es difícil en la era actual. Alcanzar un entorno donde los recursos, tanto humanos como físicos, sean utilizados de manera óptima para asegurar que cada paciente sea atendido en el momento más apropiado, sin demoras innecesarias es igualmente una utopía. Conseguir un contexto en el que los profesionales de la salud puedan desempeñar sus funciones en condiciones equilibradas, sin verse sobrecargados, mejorando así el cuidado de los pacientes y con una mayor satisfacción laboral, es asimismo inalcanzable.

La realidad muestra que, en muchos sistemas de salud, esta idealización no se materializa. Las listas de espera se prolongan, los recursos se subutilizan y los trabajadores de la salud se enfrentan a condiciones laborales exigentes. “La precariedad laboral dentro del Sistema Nacional de Salud (SNS) supone que una buena parte de los médicos españoles ejercen la profesión médica en unas condiciones en las que es muy difícil o no es posible hacer buena medicina. Pero las consecuencias no terminan ahí, continúan sobre el paciente que paga los efectos y riesgos de la inestabilidad e inseguridad laboral de los médicos que le atienden. Parte de los resultados de estas consecuencias no pueden ser otras que un aumento de listas de espera y un deterioro de la calidad de la asistencia sanitaria, aumentando innecesariamente los riesgos para los pacientes, que son inherentes a toda intervención sanitaria” (Médicos y Pacientes, 2022).

Este Trabajo Fin de Grado representa un pequeño paso hacia la transformación de esa realidad y aborda una cuestión de gran envergadura en el contexto de la atención médica: la planificación de la Atención Hospitalaria Médico-Quirúrgica, una problemática real que se presenta como un reto ineludible y que afecta a la calidad de la atención médica y el bienestar de los profesionales de la salud.

1.2 Objetivos

El objetivo primordial de este Trabajo Fin de Grado es el desarrollo de dos modelos de programación lineal para la gestión de personal en el ámbito sanitario que determine la planificación semanal integrada de la actividad asistencial y la organización anual del trabajo de los cirujanos en el proceso de Atención Hospitalaria Médico-Quirúrgica: el primero sin considerar periodos vacacionales, formaciones médicas y permisos por matrimonio y el segundo considerando estos aspectos. “La optimización del flujo de pacientes implica la práctica de optimizar los movimientos de los pacientes a través de los sistemas sanitarios de forma eficiente y eficaz, para proporcionar una asistencia sanitaria adecuada en todos los puntos de contacto” (Pedroto, 2023).

En línea con este objetivo principal, se persiguen además estos otros propósitos:

- Asegurar la validación de los modelos experimentalmente: validar los modelos desarrollados mediante su implementación en Python, garantizando su eficacia y utilidad práctica.
- Analizar diversos escenarios: estudiar los modelos en una amplia variedad de casos y escenarios, considerando diferentes políticas de consultas y quirófanos.
- Analizar la inclusión de la gestión de los recursos humanos en la planificación de los pacientes: evaluar cómo afecta, en última instancia, a la planificación esta consideración a través de la comparación de los resultados alcanzados con cada uno de los modelos desarrollados.

- Garantizar la aplicabilidad a otros entornos: asegurar que la herramienta desarrollada sea adaptable y extensible a otros contextos hospitalarios, permitiendo su utilización en diferentes áreas de atención médica.
- Desarrollar una herramienta de planificación: diseñar una herramienta informática que permita la planificación eficiente del calendario laboral de los cirujanos, facilitando la asignación de pacientes y recursos en el proceso de Atención Hospitalaria Médico-Quirúrgica.
- Identificar futuras líneas de investigación: proporcionar posibles ampliaciones de los modelos desarrollados incluyendo nuevos aspectos de la planificación de la atención médica antes no considerados.

Finalmente, dos últimos propósitos adicionales son la comunicación efectiva de este documento y su enfoque práctico y realista. En este trabajo se hará uso de un lenguaje accesible y comprensible para todo tipo de lectores, sin comprometer su rigurosidad, precisión y propiedad. El objetivo es que los resultados alcanzados y presentados puedan ser comprendidos y valorados por diversos perfiles de receptores, contribuyendo así realmente al conocimiento y la mejora en la gestión de la atención médica en el ámbito hospitalario.

1.3 Sumario

El siguiente resumen proporciona una visión general de los contenidos de este documento, destacando los aspectos más relevantes de cada sección:

1. Introducción. En primer lugar, se presenta la contextualización y los objetivos de este Trabajo Fin de Grado.
2. Descripción del problema. A continuación, se plantea el problema sanitario objeto de estudio en este documento, destacando sus implicaciones, dificultades y desafíos.
3. Enfoque, ámbito de aplicación y aspectos particulares del problema. Posteriormente, se define la perspectiva desde la que se aborda, indicando su alcance. Además, se detalla y concreta el problema antes planteado.
4. Metodología de resolución. Seguidamente, se explican las diferentes opciones de resolución consideradas y el método finalmente elegido para abordar el problema.
5. Modelado del problema. Después, se exponen los modelos desarrollados, las aclaraciones y los comentarios necesarios sobre sus variables, sus funciones objetivo y sus restricciones.
6. Generación de instancias: factores, conjuntos y parámetros. Acto seguido, se detalla la definición de los elementos que nutren los modelos y se explica el proceso de generación de estos.
7. Experimentación. Luego, se presentan el software y el *solver* utilizados para la implementación de los modelos matemáticos, se presentan los escenarios considerados y los indicadores analizados. Por último, se estudian los resultados obtenidos.
8. Futuras líneas de investigación. Tras esto, se exploran las posibles áreas de investigación que podrían derivarse de este estudio, profundizando en aquellos aspectos no abordados con los modelos propuestos.
9. Conclusiones. Finalmente, se destacan los logros y objetivos alcanzados en la investigación, así como los desafíos encontrados durante el desarrollo de este documento.

2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El sistema de salud es un componente fundamental en cualquier sociedad moderna, y su correcto funcionamiento es esencial para asegurar la atención médica adecuada a la población. En este contexto, la planificación y gestión de las actividades médicas, en particular, las intervenciones quirúrgicas, se erigen como una tarea crítica para garantizar una atención eficiente. “Un servicio de salud de buena calidad debe ser seguro, apropiado, clínicamente efectivo y receptivo a las necesidades de los pacientes” (OCDE, 2021). En este capítulo se presenta y se aborda el problema sanitario que impulsa y motiva la realización de este Trabajo Fin de Grado.

2.1 Problema sanitario

Históricamente, la programación y planificación de cirugías se ha realizado de manera manual, una metodología poco rigurosa que genera ineficiencias y que a menudo propicia cierta subutilización de los recursos disponibles. “La programación de cada jornada quirúrgica se realiza de una forma manual, empírica y subjetiva, presuponiendo la duración de las intervenciones quirúrgicas a realizar en dependencia de la experiencia del servicio, de quien realiza la programación y de las costumbres y características del hospital” (Albareda et al., 2017).

Es precisamente este el problema sanitario sobre el que se centra el documento: la planificación anual de la actividad asistencial del proceso de Atención Hospitalaria Médico-Quirúrgica, en adelante referenciado por las siglas AH-MQ, considerando las limitaciones impuestas por los recursos disponibles, tanto físicos como humanos. Asimismo, se enfoca en los principales derechos laborales reconocidos en el Estatuto de los Trabajadores (Boletín Oficial del Estado, 2019), para optimizar la asignación de los pacientes a los diferentes cirujanos de un servicio quirúrgico, minimizando los atrasos y asegurando una eficiente gestión de consultas y quirófanos, priorizando en todo momento la continuidad asistencial. “Se entiende por continuidad asistencial, la percepción del paciente respecto al nivel de coordinación y unión de las expectativas en la atención recibida a lo largo del tiempo de manera que estas sean coherentes con sus necesidades y contexto personal” (Castro Gusmão, 2008).

Esta planificación se extiende a las diferentes etapas del proceso de AH-MQ y abarca desde la evaluación inicial del paciente hasta su posterior seguimiento tras la cirugía. Así pues, la planificación asistencial comprende tres fases fundamentales en la atención hospitalaria (Fernández Pereiro, 2020):

- Etapa prequirúrgica. Esta fase ocurre antes de la cirugía y comienza con la evaluación del paciente en una consulta médica. Es, por tanto, la primera fase del proceso y permite identificar posibles riesgos que puedan surgir durante la intervención.
- Etapa quirúrgica. Esta segunda fase involucra la realización de las intervenciones quirúrgicas de los pacientes en un quirófano. La cirugía se realiza por un equipo de cirujanos, compuesto por un cirujano principal y un cirujano auxiliar.
- Etapa postquirúrgica. Después de la cirugía, los pacientes reciben de nuevo atención en una consulta médica para evaluar su recuperación. En esta tercera y última fase, se realizan seguimientos médicos para garantizar que los pacientes estén progresando adecuadamente después de la cirugía.

Asimismo, la planificación de la actividad asistencial implica el uso eficiente de las consultas y los quirófanos. Estos recursos físicos son esenciales para la realización de los procedimientos médicos y quirúrgicos, y su asignación adecuada impacta directamente en la eficiencia de la atención hospitalaria. En este sentido, “es crucial considerar que los quirófanos representan los recursos de mayor coste de todos los que dispone un servicio quirúrgico, además de los más limitados, siendo el cuello de botella de su funcionamiento, por lo que es indispensable obtener de ellos el máximo rendimiento. De su adecuada gestión y planificación se desprenden, además de una disminución de los costes por proceso, una disminución de los pacientes en lista de espera quirúrgica” (Albareda et al., 2017).

No obstante, este proceso también involucra la gestión eficaz de los recursos humanos, en particular, la programación de los cirujanos y la distribución de sus turnos. Para alcanzarla, es importante considerar aquellos

aspectos que influyen en la disponibilidad de los médicos, especialmente periodos de vacaciones, formaciones médicas y permisos. La implementación de estos factores en las planificaciones es esencial para lograr una representación precisa del entorno hospitalario real.

Además, la diversidad de procedimientos médicos y quirúrgicos realizados en el ámbito hospitalario añade una dimensión adicional de dificultad, puesto que para un determinado tipo de intervención se requiere una serie de requisitos distintos en términos de recursos necesarios, duraciones de las etapas y niveles de complejidad. A su vez, cada tipo de intervención cuenta con unos tiempos mínimos de espera entre fases y unos tiempos máximos de respuesta entre etapas. En el caso de Andalucía, estos últimos son reconocidos por el DECRETO 209/2001, de 18 de septiembre, por el que se establece la garantía de plazo de respuesta quirúrgica en el Sistema Sanitario Público de Andalucía. En consecuencia, la eficaz gestión de los recursos físicos y humanos debe adaptarse a las especificidades de cada tipo de intervención con el propósito de garantizar una atención médica de alta calidad.

Igualmente, este problema sanitario se vuelve aún más complejo al considerar las listas de espera iniciales en cada etapa del proceso de AH-MQ al inicio de la planificación y al contemplar las demandas semanales de los diferentes tipos de intervención, entendidas como el número de pacientes que llegan al proceso de AH-MQ en una semana concreta. Albareda et al. (2017) asegura que “la gestión correcta de las listas de espera es primordial, no solamente bajo el punto de vista de la salud del paciente, sino bajo otros aspectos sociosanitarios, ya que puede poner de manifiesto un desajuste entre la demanda sanitaria social y la oferta que ofrece la administración. La resolución de la lista de espera depende, más que del número en sí de pacientes incluidos, de la asignación de recursos, y no tanto de su aumento directo sino de su correcta y adecuada gestión”.

En el contexto de la AH-MQ, la demanda puede variar en función de múltiples factores, como la estacionalidad de ciertas enfermedades, las tasas de diagnóstico, la disponibilidad de servicios médicos externos o la población atendida por el hospital, por lo que comprender y anticipar esta demanda es esencial para garantizar una asignación eficiente de recursos y una gestión efectiva de las listas de espera en cada etapa del proceso.

2.2 Gestión de los recursos humanos en el ámbito hospitalario

Adicionalmente, la organización del trabajo, la asignación de los turnos de consulta y de quirófano, la planificación de las vacaciones, la consideración de los permisos y las formaciones entre otros, pueden afectar a la satisfacción laboral y la calidad de vida de los profesionales de la salud, impactando positiva o negativamente en la atención y la eficiencia del sistema sanitario en general. “El grado de calidad de los servicios ofertados en un sistema sanitario está directamente relacionado con el nivel de satisfacción de los profesionales que trabajan en él” (Pérez-Ciordia et al., 2013). Es por ello por lo que se torna esencial considerar las principales disposiciones y regulaciones establecidas en el Estatuto de los Trabajadores (Boletín Oficial del Estado, 2019) para completar el problema de manera integral.

Un entorno laboral bien organizado, que tenga en cuenta las necesidades y derechos de los trabajadores, no solo fomenta el bienestar de los trabajadores, sino que también influye en su motivación y compromiso con la atención médica. “El personal con alto nivel de satisfacción laboral proporciona un servicio de mayor calidad y más resolutivo de las necesidades de salud de la población” (Pérez-Ciordia et al., 2013).

En este contexto, cumplir con las disposiciones del Estatuto de los Trabajadores (Boletín Oficial del Estado, 2019) no solo permite mejorar el bienestar de los empleados, sino que también contribuye al buen funcionamiento del sistema sanitario en su conjunto.

El Estatuto de los Trabajadores (Boletín Oficial del Estado, 2019) recopila las normas fundamentales del Derecho Laboral Español y establece los derechos y deberes de los trabajadores, así como sus condiciones laborales. Este estatuto no solo es una referencia legal, sino que también promueve un entorno laboral justo, seguro y equitativo para los empleados.

En este sentido, según el Boletín Oficial del Estado (2019), el estatuto establece que:

- El periodo de vacaciones anuales retribuidas, no sustituible por compensación económica, será el pactado en convenio colectivo o contrato individual. En ningún caso la duración será inferior a treinta días naturales.
- El trabajador, previo aviso y justificación, podrá ausentarse del trabajo, con derecho a remuneración,

quince días naturales en caso de matrimonio.

- El trabajador tendrá derecho: a la concesión de los permisos oportunos de formación o perfeccionamiento profesional con reserva del puesto de trabajo.

Teniendo esto en cuenta, el problema se resume en optimizar la asignación de los pacientes de los diferentes tipos de intervención a los cirujanos para asegurar que son atendidos en las diferentes etapas del proceso AH-MQ cumpliendo con los decretos sanitarios establecidos, minimizando los atrasos y satisfaciendo todos los requerimientos necesarios.

Ante el complejo problema sanitario expuesto, la planificación de la actividad asistencial se presenta como una herramienta fundamental para asegurar la correcta atención de los pacientes y mejorar la gestión del personal en el ámbito sanitario. Mediante esta planificación se establecen las semanas en las que se llevarán a cabo las diferentes etapas del proceso de AH-MQ de los pacientes de los diferentes tipos de intervención, al mismo tiempo que se fijan los cirujanos responsables de las mismas.

En definitiva, esta planificación proporciona un cuadrante anual que detalla semana a semana el número de pacientes asignados a cada cirujano en cada etapa, así como las vacaciones, formaciones y permisos de los diferentes médicos, proporcionando una visión clara de la programación de los cirujanos y facilitando la toma de decisiones para el beneficio tanto del personal médico como de los pacientes.

3 ENFOQUE, ÁMBITO DE APLICACIÓN Y ASPECTOS PARTICULARES DEL PROBLEMA

Conocido e identificado el problema sanitario planteado, se concreta ahora el enfoque desde el que se aborda dicha gestión y el posible ámbito de aplicación de los modelos de programación lineal planteados en este documento. Posteriormente, se detallan el resto de aspectos fundamentales que caracterizan el problema, buscando establecer unas bases sólidas para el desarrollo de dichos modelos.

3.1 Enfoque y ámbito de aplicación del problema

El problema es abordado de forma ilustrativa para ampliar el ámbito de aplicación de los modelos y no limitar sus alcances, por lo que se enfoca desde la planificación de un servicio quirúrgico genérico. Se busca desarrollar un caso general que pueda adaptarse a los diferentes escenarios y contextos de cada área, con el objetivo de que cada una sea capaz de realizar su propia planificación a partir de sus propios datos en el mundo real.

Por tanto, los valores de los diferentes parámetros y conjuntos que aparecen en los modelos son solo orientativos, pero estimados para ser cercanos a los que podrían tomar en situaciones reales, permitiendo conseguir así resultados significativos. El número de quirófanos y consultas que tiene asignado el servicio quirúrgico, los tipos de intervenciones que realiza, junto con sus duraciones medias, sus tiempos de respuesta, sus demandas, sus listas de espera... no se basan en datos extraídos de ninguna unidad real en concreto, sino que toman valores hipotéticos, ajustados con fines explicativos.

En conclusión, el enfoque planteado aporta un nivel de decisión superior y permite planificar la actividad quirúrgica en función de las demandas, las listas de espera y los recursos físicos y humanos de los que disponga el servicio quirúrgico concreto que emplee los modelos, ofreciendo una visión panorámica y general del horizonte temporal estudiado y considerando en todo momento los aspectos relacionados con la gestión de personal.

3.2 Aspectos particulares del problema

Siguiendo el enfoque planteado y con el objetivo de construir una planificación hospitalaria a largo plazo, se considera un horizonte temporal de planificación de 52 semanas (denotado por el conjunto H). La actividad asistencial de los cirujanos (denotado por el conjunto C) es discretizada en semanas, proporcionando, así, una visión general y orientativa no solo centrada en el día a día, permitiendo una mejor gestión de los recursos (consultas, quirófanos y cirujanos del servicio quirúrgico) a nivel global (denotado por el conjunto J). En este sentido, se traslada igualmente el tratamiento individual de los pacientes a la gestión integrada de ellos en función de su tipo de intervención (denotado por el conjunto I), proporcionando de nuevo al problema un enfoque más abierto y un nivel de decisión superior.

Además, en línea también con esta estrategia, el modelo se desarrolla para un servicio quirúrgico que cuenta un número de quirófanos y de consultas definido, cuyas disponibilidades a_{jh} son conocidas a lo largo del horizonte temporal. Estas pueden disminuir puntualmente alguna semana debido a múltiples factores, como por ejemplo el propio mantenimiento de las instalaciones.

El proceso de planificación de los pacientes en sí mismo es el siguiente:

- En primer lugar, los pacientes de un tipo de intervención son planificados para la etapa prequirúrgica a lo largo del horizonte temporal con uno de los diferentes cirujanos que conforma el servicio quirúrgico, en función de las necesidades y de los recursos disponibles.
- Posteriormente, vuelven a ser planificados para la etapa quirúrgica, con el mismo cirujano por los que fueron atendidos en la etapa anterior, garantizando la continuidad asistencial, y con otro cirujano que actúa como auxiliar en la operación.

- Finalmente, vuelven a ser planificados para la etapa postquirúrgica, de nuevo en consulta con el cirujano que lo trató durante las fases anteriores.

En función de la etapa en la que se encuentren, los pacientes de los diferentes tipos de intervenciones son atendidos por los cirujanos durante las jornadas de quirófano y de consulta que estos dedican al proceso de AH-MQ cada semana, ambos turnos de ocho horas. La disponibilidad máxima de estos médicos para este proceso es de cinco turnos semanales.

No obstante, a lo largo del horizonte temporal es posible que algunos cirujanos no se encuentren realizando actividad asistencial puntualmente. Los cirujanos que se encuentran disfrutando de sus vacaciones, permisos matrimoniales o formaciones médicas no pueden atender pacientes durante estos periodos, puesto que no se encuentran realizando actividad asistencial, por lo que el número de turnos que tienen asociados esas semanas es nulo. Las formaciones y permisos se consideran conocidos al inicio de la planificación y, por tanto, no forman parte del nivel de decisión, a diferencia de las vacaciones, determinadas en función de las necesidades del personal médico y de sus prioridades.

En cualquier caso, es imprescindible contar en todo momento con un número mínimo de cirujanos para evitar que la planificación se vea afectada negativamente por las ausencias del personal médico. Para asegurar esto, el servicio quirúrgico dispone de un número de cirujanos tal que asegura contar con disponibilidad de personal en exceso, garantizando siempre que los recursos humanos disponibles sean suficientes para cubrir las consultas y los quirófanos. Además, este exceso de personal permite a los cirujanos realizar otras tareas propias del servicio quirúrgico.

Debido a las múltiples actividades que realizan estos médicos, es posible que no todos los turnos estén dedicados al proceso de AH-MQ, por lo que el número de turnos semanales que realiza cada cirujano puede ser menor que cinco. Al cubrir los recursos físicos con exceso de personal, se permite que los cirujanos no destinados a consultas y quirófanos puedan dedicarse al resto de tareas.

Por otra parte, tanto cirujanos como tipos de intervención poseen diferentes niveles de habilidad. Los cirujanos cuentan con ciertos niveles de habilidad s_c para tratar los diferentes tipos de intervenciones que se realizan en el servicio quirúrgico, las cuales requieren, igualmente, una habilidad mínima para poder ser tratadas por un cirujano s_i . De este modo, un cirujano no atenderá un tipo de intervención si no tiene la habilidad necesaria para ello.

Igualmente, para asegurar una adecuada planificación, los pacientes deben ser atendidos en la etapa correspondiente antes de superar el número máximo de semanas entre fases r_{ei} , pero después de cumplir las semanas mínimas de espera establecidas e_{eer} . Por un lado, los tiempos máximos de respuestas entre etapas garantizan que no se excedan los plazos establecidos y se mantenga un flujo adecuado en el proceso de intervención quirúrgica. Por otro, los tiempos de espera mínimos entre fases aseguran que se cumplan los requerimientos necesarios para pasar de una etapa a otra de manera adecuada, evitando así una transición apresurada o inadecuada. Solo se consideran e_{eer} entre las etapas prequirúrgica y quirúrgica y entre las etapas quirúrgica y postquirúrgica.

Semana en la que el paciente es atendido en la etapa prequirúrgica	Semana mínima en la que puede ser atendido en la etapa quirúrgica	Semana máxima en la que puede ser atendido en la etapa quirúrgica
h	$h + e_{12}$	$h + e_{12} + r_{2i}$

Tabla 1 - Semanas mínimas de espera y máximas de respuesta entre etapas

Semana en la que el paciente es atendido en la etapa quirúrgica	Semana mínima en la que puede ser atendido en la etapa postquirúrgica	Semana máxima en la que puede ser atendido en la etapa postquirúrgica
h	$h + e_{23}$	$h + e_{23} + r_{3i}$

Tabla 2 - Semanas mínimas de espera y máximas de respuesta entre etapas

Adicionalmente, los tipos de intervención se encuentran caracterizados por las duraciones de cada una de sus etapas del proceso de AH-MQ, t_{ei} . Estas duraciones medias determinan el tiempo necesario para llevar a cabo

las fases prequirúrgica, quirúrgica y postquirúrgica y, en definitiva, el consumo de recursos.

Cada tipo de intervención cuenta, a su vez, con unas listas de espera iniciales específicas para cada etapa. La primera etapa cuenta con una para cada tipo de intervención, común para todos los cirujanos, mientras que las de las siguientes etapas son individuales para cada uno de ellos, asegurando aplicar la continuidad asistencial. Así, los pacientes parten de una lista de espera común y, al ser planificados con un cirujano en concreto en la primera etapa, pasan a su lista particular.

Los pacientes llegan al sistema a lo largo de las diferentes semanas del horizonte temporal. La demanda semanal d_{ih} indica el número de pacientes de cada tipo de intervención que se espera que lleguen a la etapa prequirúrgica del proceso de AH-MQ en una semana determinada.

Considerando todos estos aspectos, el problema aborda varios desafíos fundamentales en la planificación de la atención hospitalaria, persiguiendo:

- Maximizar el número de pacientes planificados y atenderlos eficientemente a lo largo de las diferentes etapas del proceso de AH-MQ en función de sus necesidades y las capacidades disponibles, garantizando que sean tratados en el momento adecuado.
- Minimizar el número de pacientes atrasados y sin atender, gestionando de manera efectiva las listas de espera iniciales en cada etapa del proceso y la demanda semanal, evitando retrasos, cumpliendo los tiempos de respuesta y garantizando la continuidad asistencial.
- Mejorar la gestión de los recursos humanos, en particular, la programación de las vacaciones de los cirujanos y la asignación de sus turnos, para garantizar una distribución equitativa de la carga de trabajo.
- Optimizar la utilización de quirófanos y consultas para lograr una asignación eficiente de los recursos físicos, minimizando los tiempos de inactividad y maximizando su uso.

Es necesario perseguir y considerar todos estos detalles para desarrollar un modelo de programación lineal adecuado como el que se plantea a continuación, que facilite la gestión de las listas de espera iniciales y la planificación de la demanda a través la programación adecuada de los servicios hospitalarios.

4 METODOLOGÍA DE RESOLUCIÓN

A continuación, se exponen los diversos métodos de resolución que podrían haber sido empleados para abordar el problema en cuestión. Se detalla asimismo la elección finalmente escogida, junto con las razones que llevaron a su elección.

4.1 Posibles métodos de resolución

Como se ha mostrado, la gestión eficiente del personal en el ámbito sanitario es un desafío crucial para garantizar una atención médica de calidad y una operación óptima de los servicios de salud. La asignación adecuada de recursos físicos y humanos es esencial para satisfacer la demanda de pacientes y optimizar el rendimiento del sistema sanitario. En este contexto, existen diversos métodos de resolución desde el que abordar el complejo problema planteado, entre ellos:

- **Métodos Heurísticos.** “Se califica de heurístico a un procedimiento para el que se tiene un alto grado de confianza en que encuentra soluciones de alta calidad con un coste computacional razonable, aunque no se garantice su optimalidad o su factibilidad, e incluso, en algunos casos, no se llegue a establecer lo cerca que se está de dicha situación. Se usa el calificativo heurístico en contraposición a exacto” (Riojas Cañari, 2005).
- **Métodos Metaheurísticos.** “Los procedimientos metaheurísticos son una clase de métodos aproximados que están diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria, en los que los heurísticos clásicos no son ni efectivos ni eficientes. Los metaheurísticos proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos combinando diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica y la mecánica estadística” (Universitat Politècnica de València, 2015).
- **Optimización Multiobjetivo.** “El problema de optimización multiobjetivo, también denominado de optimización vectorial o multicriterio, se puede definir en términos genéricos como la determinación de los valores para un vector de variables de decisión que satisfaga un conjunto de restricciones y optimice una función vectorial, cuyos elementos representan las funciones objetivo individuales” (Ríos-Insua et al., 2004).
- **Simulación.** “Proceso en que se representa el estado del sistema mediante unas variables relacionadas por unas reglas determinadas. Una vez establecidas, se observa su evolución a lo largo del tiempo según unas hipótesis y unas reglas de gestión predeterminadas. Permite conocer la solución de problemas difícilmente resolubles mediante los métodos exactos” (Suñé et al., 2016).
- **Otros enfoques basados en Inteligencia Artificial.** “La optimización de programas informáticos es un campo en constante evolución, y la inteligencia artificial (IA) ha emergido como una herramienta valiosa para lograr mejores resultados” (Erazo-Luzuriaga et al., 2023).

4.2 Método de resolución adoptado

Entre las diversas alternativas de resolución disponibles, se ha optado, por diversos motivos, por el uso de la programación lineal entera para abordar el problema en cuestión. “La programación lineal es un método matemático de resolución de problemas donde el objetivo es optimizar (maximizar o minimizar) un resultado a partir de seleccionar los valores de un conjunto de variables de decisión, respetando restricciones correspondientes a disponibilidad de recursos, especificaciones técnicas, u otras condicionantes que limiten la libertad de elección” (Alvarado Boirivant, 2008). En particular, la programación lineal entera exige que algunas o todas las variables de decisión tomen únicamente valores enteros en lugar de valores continuos.

La programación lineal ha sido ampliamente utilizada en el ámbito hospitalario y de la salud. Numerosos modelos han sido desarrollados para abordar temas similares, como la gestión del flujo de pacientes, la

planificación de intervenciones, la asignación de camas a los pacientes o la programación de quirófanos y consultas:

- Desarrollo de modelos de programación lineal para la gestión del flujo de pacientes en un servicio de urgencias hospitalario (López Garcelán, 2023).
- Integración de planificación de intervenciones en quirófanos y camas postoperatorias (Nieto Medina, 2021).
- Planificación de quirófanos con consultas integradas: modelos de programación lineal entera para la resolución de un caso real (Santaella Regadera, 2022).
- Integrated master surgery and outpatient clinic scheduling (Bovim et al., 2022).
- Diseño de un modelo de planeación agregada para las prestaciones médicas en un servicio de ginecología y obstetricia (Gallegos & Santelices Malfanti, 2010).

Así pues, la programación lineal entera sobresale como una de las técnicas de optimización más efectivas para la gestión del personal en el ámbito sanitario, la planificación de la actividad asistencial y, en definitiva, para el problema planteado.

Además, la elección de esta técnica frente al resto de opciones y propuestas también ha sido motivada por el carácter exacto de la programación lineal, permitiendo alcanzar la solución óptima para problemas de determinados tamaños.

Si bien, “los métodos exactos no son siempre la respuesta adecuada, ya que presentan varias desventajas que impiden su uso en muchos problemas aplicados y existen problemas que bajo su enfoque no pueden ser resueltos debido a su complejidad o al gran tamaño de su espacio de búsqueda” (Morillo et al., 2013), la visión aportada por la programación lineal y sus soluciones exactas permiten validar y analizar exhaustivamente los modelos desarrollados y sus restricciones, estableciendo un punto de partida sólido para la resolución de problemas de dimensiones considerablemente superiores mediante otras técnicas y métodos.

Debido a los motivos expuestos, se empleará la programación lineal entera para abordar el problema de la planificación de la actividad asistencial y la gestión del personal en el ámbito sanitario, en conjunto con el lenguaje de programación Python, utilizando la librería MIP (Mixed Integer Programming), para desarrollar una solución al problema planteado

5 MODELADO DEL PROBLEMA

La programación lineal requiere la formulación de un modelo matemático, un conjunto de variables y restricciones y una función objetivo, que expresa el problema real en términos matemáticos utilizando ecuaciones y desigualdades lineales.

Las variables simbolizan las incógnitas del problema, las restricciones limitan las soluciones válidas y la función objetivo define el objetivo a maximizar o minimizar. En definitiva, el modelo matemático proporciona una representación formal y precisa del problema sobre el que aplicar las técnicas de la programación lineal entera.

Para analizar el impacto de las vacaciones, las formaciones y los permisos de los cirujanos en la planificación hospitalaria, se desarrollan dos modelos similares:

- **Modelo básico de planificación asistencial:** más sencillo, algo más simplificado al omitir los factores relacionados con las ausencias laborales y considerar que todos los cirujanos están disponibles para realizar actividad asistencial todas las semanas. Este modelo proporciona una evaluación inicial básica al ignorar la gestión del personal en la planificación.
- **Modelo integral de planificación asistencial y gestión del personal:** más realista, al incorporar los principales derechos laborales reconocidos en el Estatuto de los Trabajadores (Boletín Oficial del Estado, 2019). Este modelo considera las semanas de vacaciones, formaciones y permisos de cada cirujano, brindando una planificación más acertada y precisa de la actividad asistencial.

El desarrollo y la ejecución de ambos modelos permite comparar desde diferentes perspectivas la planificación asistencial y contrastar los resultados obtenidos con cada uno.

A continuación, se presentan ambos modelos.

5.1 Modelo básico de planificación asistencial

- Conjuntos:

$j \in J$	Conjunto de tipo de recursos
$i \in I$	Conjunto de tipos de intervenciones
$c \in C$	Conjunto de cirujanos
$h \in H$	Conjunto de semanas del horizonte temporal
$e \in E$	Conjunto de etapas

Tabla 3 - Conjuntos del modelo básico de planificación asistencial

- Parámetros:

a_{jh}	Disponibilidad del tipo de recurso j en la semana h (minutos/turno)
t_{ei}	Duración de la etapa e para el tipo de intervención i (minutos)
s_i	Habilidad mínima requerida para tratar a un paciente con tipo de intervención i
s_c	Habilidad del cirujano c
r_{ei}	Tiempo máximo de respuesta de la etapa e para el tipo de intervención i (semanas)
$e_{ee'}$	Tiempo mínimo de espera entre las etapas e y e' (semanas)
n_{turnos}	Número máximo de turnos por semana de cada cirujano
min_{turno}	Minutos por turno
d_{ih}	Demanda del tipo de intervención i en la semana h en la etapa prequirúrgica

$LE1_{inicial_i}$	Lista de espera inicial del tipo de intervención i en la etapa prequirúrgica
$LE2_{inicial_{ich}}$	Lista de espera inicial de la semana h del cirujano c para el tipo de intervención i en la etapa quirúrgica
$LE3_{inicial_{ich}}$	Lista de espera inicial de la semana h del cirujano c para el tipo de intervención i en la etapa postquirúrgica
$TEM1_i$	Tiempo de espera medio de los pacientes en lista de espera del tipo de intervención i en la etapa prequirúrgica
$TEM2_i$	Tiempo de espera medio de los pacientes en lista de espera del tipo de intervención i del cirujano c en la etapa quirúrgica
$TEM3_i$	Tiempo de espera medio de los pacientes en lista de espera del tipo de intervención i del cirujano c en la etapa postquirúrgica
γ_1	Coeficiente de ponderación para los pacientes atendidos
γ_2	Coeficiente de ponderación para los pacientes atrasados
γ_3	Coeficiente de ponderación para los pacientes sin atender
<i>TOTAL DEMANDA e, TOTAL LEE INICIAL, MAXIMOS PACIENTES ATRASADOS LEE, MAXIMO ATRASO LEE, MAXIMOS PACIENTES ATRASADOS e, MAXIMO ATRASO e, TOTAL LEE, TOTAL DEMANDA e, parámetros auxiliares para la definición de las variables de la función objetivo</i>	

Tabla 4 - Parámetros del modelo básico de planificación asistencial

- Variables:

N_{jch}	Número de turnos del tipo de recurso j del cirujano c en la semana h
$X1_{ich'h}$	Número de pacientes con tipo de intervención i que llegan en la semana h' a la etapa prequirúrgica y son planificados para la semana h
$X2_{ich'h}$	Número de pacientes con tipo de intervención i que llegan en la semana h' a la etapa quirúrgica y son planificados para la semana h con el cirujano c
$X3_{ich'h}$	Número de pacientes con tipo de intervención i que llegan en la semana h' a la etapa postquirúrgica y son planificados para la semana h con el cirujano c
$X1_{ich}$	Número de pacientes con tipo de intervención i atendidos por el cirujano c para la semana h en la etapa prequirúrgica
$X2_{ich}$	Número de pacientes con tipo de intervención i atendidos por el cirujano c como principal para la semana h en la etapa quirúrgica
$X2'_{ich}$	Número de pacientes con tipo de intervención i atendidos por el cirujano c como auxiliar para la semana h en la etapa quirúrgica
$X3_{ich}$	Número de pacientes con tipo de intervención i atendidos por el cirujano c para la semana h en la etapa postquirúrgica
A_e	Pacientes atendidos en la etapa e respecto al total que podrían haber sido atendidos
$ATRLE_e$	Pacientes atendidos con atraso pertenecientes a las listas de espera iniciales de la etapa e respecto al total que, perteneciendo a estas listas, podrían haber sido atendidos con atraso
ATR_e	Pacientes atendidos con atraso que llegan a lo largo de las diferentes semanas del horizonte temporal a la etapa e respecto al total que, sin pertenecer a las listas de espera iniciales, podrían haber sido atendidos con atraso
$NALE_e$	Pacientes no atendidos pertenecientes a las listas de espera iniciales de la etapa e respecto al total que, perteneciendo a estas listas, podrían haber sido no atendidos
NA_e	Pacientes no atendidos que llegan a lo largo de las diferentes semanas del horizonte temporal a la etapa e respecto al total que, sin pertenecer a las listas de espera iniciales, podrían haber sido no atendidos

Tabla 5 - Variables del modelo básico de planificación asistencial

- Modelo matemático:

$$\text{Max } \gamma_1 \cdot (A_1 + A_2 + A_3) - \gamma_2 \cdot (ATRLE_1 + ATRLE_2 + ATRLE_3 + ATR_1 + ATR_2 + ATR_3) - \gamma_3 \cdot (NALE_1 + NALE_2 + NALE_3 + NA_1 + NA_2 + NA_3)$$

Donde:

$$A_1 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{h \in H} X1_{ich}}{\text{TOTAL DEMANDA 1} + \text{TOTAL LE1 INICIAL}} \quad (0.1)$$

$$A_2 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{h \in H} X2_{ich}}{\text{TOTAL DEMANDA 2} + \text{TOTAL LE2 INICIAL}} \quad (0.2)$$

$$A_3 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{h \in H} X3_{ich}}{\text{TOTAL DEMANDA 3} + \text{TOTAL LE3 INICIAL}} \quad (0.3)$$

$$ATRLE_1 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{\substack{h \in H \\ h > r_{1i} - TEM1_i}} X1_{icoh} \cdot (h - (r_{1i} - TEM1_i))}{\text{MAXIMOS PACIENTES ATRASADOS LE1} \cdot \text{MAXIMO ATRASO LE1}} \quad (0.4)$$

$$ATRLE_2 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{h' \in e_{12}} \sum_{\substack{h \in H \\ h > r_{2i} - TEM2_i}} X2_{icoh} \cdot (h - (r_{2i} - TEM2_i))}{\text{MAXIMOS PACIENTES ATRASADOS LE2} \cdot \text{MAXIMO ATRASO LE2}} \quad (0.5)$$

$$ATRLE_3 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{h' \in e_{23}} \sum_{\substack{h \in H \\ h > r_{3i} - TEM3_i}} X3_{icoh} \cdot (h - (r_{3i} - TEM3_i))}{\text{MAXIMOS PACIENTES ATRASADOS LE3} \cdot \text{MAXIMO ATRASO LE3}} \quad (0.6)$$

$$ATR_1 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{\substack{h' \in H \\ h' > 1}} \sum_{\substack{h \in H \\ h > h' + r_{1i}}} X1_{ich'h} \cdot (h - (h' + r_{1i}))}{\text{MAXIMOS PACIENTES ATRASADOS 1} \cdot \text{MAXIMO ATRASO 1}} \quad (0.7)$$

$$ATR_2 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{\substack{h' \in H \\ h' > e_{12}}} \sum_{\substack{h \in H \\ h > h' + e_{12} + r_{2i}}} X2_{ich'h} \cdot (h - (h' + e_{12} + r_{2i}))}{\text{MAXIMOS PACIENTES ATRASADOS 2} \cdot \text{MAXIMO ATRASO 2}} \quad (0.8)$$

$$ATR_3 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{\substack{h' \in H \\ h' > e_{23}}} \sum_{\substack{h \in H \\ h > h' + e_{23} + r_{3i}}} X3_{ich'h} \cdot (h - (h' + e_{23} + r_{3i}))}{\text{MAXIMOS PACIENTES ATRASADOS 3} \cdot \text{MAXIMO ATRASO 3}} \quad (0.9)$$

$$NALE_1 = \frac{\sum_{i \in I} (LE1_{inicial_i} - \sum_{c \in C} \sum_{h \in H} X1_{icoh}) \cdot |H|}{\text{TOTAL LE1} \cdot |H|} \quad (0.10)$$

$$NALE_2 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{h' \in e_{12}} (LE2_{inicial_{ich'}} - \sum_{\substack{h \in H \\ h > h'}} X2_{ich'h}) \cdot |H|}{\text{TOTAL LE2} \cdot |H|} \quad (0.11)$$

$$NALE_3 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{h' \in e_{23}} (LE3_{inicial_{ich'}} - \sum_{\substack{h \in H \\ h > h'}} X3_{ich'h}) \cdot |H|}{\text{TOTAL LE3} \cdot |H|} \quad (0.12)$$

$$NA_1 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{\substack{h' \in H \\ h' > 1}} ((d_{in'} - \sum_{\substack{h \in H \\ h > h'}} X1_{ich'h})) \cdot (|H| - h')}{\text{TOTAL DEMANDA 1} \cdot |H|} \quad (0.13)$$

$$NA_2 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{\substack{h' \in H \\ h' > e_{12}}} ((X1_{ich' - e_{12}} - \sum_{\substack{h \in H \\ h > h'}} X2_{ich'h})) \cdot (|H| - h')}{(\text{TOTAL DEMANDA 2} + \text{TOTAL LE1}) \cdot |H|} \quad (0.14)$$

$$NA_3 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{\substack{h' \in H \\ h' > e_{23}}} ((X2_{ich'} - e_{23} - \sum_{\substack{h \in H \\ h > h'}} X3_{ich'h}) \cdot (|H| - h'))}{(TOTAL DEMANDA 3 + TOTAL LE2) \cdot |H|} \quad (0.15)$$

Sujeto a:

$$\sum_{h' \in H} X1_{ich'h} = X1_{ich} \quad \forall i \in I, \forall c \in C, \forall h \in H \quad (1.1)$$

$$\sum_{h' \in H} X2_{ich'h} = X2_{ich} \quad \forall i \in I, \forall c \in C, \forall h \in H \quad (1.2)$$

$$\sum_{h' \in H} X3_{ich'h} = X3_{ich} \quad \forall i \in I, \forall c \in C, \forall h \in H \quad (1.3)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{i \in I} \sum_{\substack{h' \in H \\ h < h'}} X1_{ich'h} = 0 \quad \forall h \in H \quad (2.1)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{i \in I} \sum_{\substack{h' \in H \\ h < h'}} X2_{ich'h} = 0 \quad \forall h \in H \quad (2.2)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{i \in I} \sum_{\substack{h' \in H \\ h < h'}} X3_{ich'h} = 0 \quad \forall h \in H \quad (2.3)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{h \in H} X1_{ich} + X2_{ich} + X2'_{ich} + X3_{ich} = 0 \quad \forall c \in C \mid s_c < s_i \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} X1_{ich} \cdot t_{1i} + X3_{ich} \cdot t_{3i} \leq a_{jh} \quad \forall j \in J, \forall h \in H \mid j = 0 \quad (4.1)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} X2_{ich} \cdot t_{2i} \leq a_{jh} \quad \forall j \in J, \forall h \in H \mid j = 1 \quad (4.2)$$

$$\sum_{j \in J} N_{jch} \leq n_{turnos} \quad \forall c \in C, \forall h \in H \quad (5.1)$$

$$N_{jch} \cdot \min_{turno} \geq \sum_{i \in I} X1_{ich} \cdot t_{1i} + X3_{ich} \cdot t_{3i} \quad \forall j \in J, \forall c \in C, \forall h \in H \mid j = 0 \quad (5.2)$$

$$N_{jch} \cdot \min_{turno} \geq \sum_{i \in I} X2_{ich} \cdot t_{2i} + X2'_{ich} \cdot t_{2i} \quad \forall j \in J, \forall c \in C, \forall h \in H \mid j = 1 \quad (5.3)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{h \in H} X1_{ich} \leq \sum_{h \in H} d_{ih} + LE1_i \quad \forall i \in I \quad (6.1)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{\substack{h \in H \\ h \geq h'}} X1_{ich'h} \leq LE1_i \quad \forall i \in I, \forall h' \in H \mid h' = 0 \quad (6.2)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{\substack{h \in H \\ h \geq h'}} X1_{ich'h} \leq d_{ih'} \quad \forall i \in I, \forall h' \in H \mid h' > 0 \quad (6.3)$$

$$\sum_{h \in H} X2_{ich} \leq \sum_{h \in H-e_{12}} X1_{ich} + \sum_{h \in e_{12}} LE2_{ich} \quad \forall i \in I, \forall c \in C \quad (6.4)$$

$$\sum_{\substack{h \in H \\ h \geq h'}} X2_{ich'h} \leq LE2_{ich'} \quad \forall i \in I, \forall c \in C, \forall h' \in H \mid h' < e_{12} \quad (6.5)$$

$$\sum_{\substack{h \in H \\ h \geq h'}} X2_{ich'h} \leq X1_{ich-e_{12}} \quad \forall i \in I, \forall c \in C, \forall h' \in H \mid h' \geq e_{12} \quad (6.6)$$

$$\sum_{h \in H} X3_{ich} \leq \sum_{h \in H-e_{23}} X2_{ich} + \sum_{h \in e_{23}} LE3_{ich} \quad \forall i \in I, \forall c \in C \quad (6.7)$$

$$\sum_{\substack{h \in H \\ h \geq h'}} X3_{ich'h} \leq LE3_{ich'} \quad \forall i \in I, \forall c \in C, \forall h' \in H \mid h' < e_{23} \quad (6.8)$$

$$\sum_{\substack{h \in H \\ h \geq h'}} X3_{ich'h} \leq X2_{ich-e_{23}} \quad \forall i \in I, \forall c \in C, \forall h' \in H \mid h' \geq e_{23} \quad (6.9)$$

$$\sum_{c \in C} X2_{ich} = \sum_{c \in C} X2'_{ich} \quad \forall i \in I, \forall h \in H \quad (7.1)$$

$$X2'_{ich} \leq \sum_{\substack{c' \in C \\ c' \neq c}} X2_{ic'h} \quad \forall i \in I, \forall c \in C, \forall h \in H \quad (7.2)$$

$$N_{jch} \geq 0 \quad \forall j \in J, \forall c \in C, \forall h \in H \quad (8.1)$$

$$X1_{ich'h}, X2_{ich'h}, X3_{ich'h} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall c \in C, \forall h' \in H, \forall h \in H \quad (8.2)$$

$$X1_{ich}, X2_{ich}, X2'_{ich}, X3_{ich} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall c \in C, \forall h \in H \quad (8.3)$$

$$A_e, ATRLE_e, ATR_e, NALE_e, NA_e \geq 0 \quad \forall e \in E \quad (8.4)$$

Mostrado el modelo, a continuación, se exponen las aclaraciones y explicaciones necesarias sobre el mismo.

En cuanto a las variables, el modelo cuenta con tres grandes conjuntos:

- Las relativas a los turnos de los cirujanos.
- Las relacionadas con el número de pacientes planificados.
- Las empleadas para la función objetivo.

El primero se usa para modelar los turnos de consulta y quirófano de cada cirujano cada semana.

El segundo necesita una explicación más detallada y con más profundidad.

En general, en el modelo se distinguen dos conjuntos de variables para cada etapa, relacionadas directamente con la planificación de los pacientes:

- Uno que indica el número de pacientes de un tipo de intervención que ha sido planificado para la semana h con el cirujano c , independientemente de la semana en la que han llegado a la etapa correspondiente: Xe_{ich} .
- Otro que refleja esta información, incluyendo esa semana de llegada h' : $Xe_{ich'h}$.

De forma que Xe_{ich} reúne todos los pacientes del tipo de intervención i planificados con el cirujano c para la semana h , sin tener en cuenta sus semanas de llegada a la etapa, h' . En otras palabras, Xe_{ich} agrega todas las $Xe_{ich'h}$ para la semana h :

		h' - semana en la que llegan los pacientes					
		↑					
		I	c	h'	h		
V. Desagregada	$X2_{ich'h}$	[0]	[0]	[0]	[2]	=	1
	$X2_{ich'h}$	[0]	[0]	[1]	[2]	=	2
	$X2_{ich'h}$	[0]	[0]	[2]	[2]	=	4
	$X2_{ich'h}$	[0]	[0]	[3]	[2]	=	0
	$X2_{ich'h}$	[0]	[0]	[4]	[2]	=	0
		↓					
		h - semana para la que se planifican					

$=$	$X2_{ich}$	i	c	h	=	7
		[0]	[2]	[2]		

Tabla 6 - Ejemplo de agregación de las variables desagregadas

Esto permite:

- Contar con una variable que a nivel de semana aporta toda la información de forma compacta, agregando las planificaciones (Xe_{ich}).
- Conservar información útil sobre las semanas de llegada de los pacientes a las etapas, gracias a las variables desagregadas ($Xe_{ich'h}$).
- Cuantificar el número de semanas que los pacientes están en una etapa ($h - h'$), para así controlar los atrasos de cada una.

El tercer conjunto reúne las variables que aparecen en la función objetivo. Esta sigue el enfoque general del problema y busca maximizar el número total de pacientes asignados en cada etapa y minimizar al mismo tiempo tanto los pacientes atrasos en cada una de ellas como las pacientes sin atender:

- Los términos A_1 , A_2 y A_3 representan la proporción de pacientes que han sido planificados para las etapas correspondientes respecto al número total de pacientes que potencialmente podrían haberse atendido:
 - o A_1 vendrá dado por el número total de pacientes atendidos en la fase prequirúrgica entre la demanda total que llega a la fase (esto es, toda la demanda que llega a lo largo del horizonte temporal) (*TOTAL DEMANDA 1*) más el total de pacientes que se encontraban en las listas de espera iniciales de la etapa prequirúrgica (*TOTAL LE1 INICIAL*).
 - o A_2 será igual al número total de pacientes atendidos en la etapa quirúrgica entre la demanda que llega antes de $|H| - e_{12}$ (es decir, aquella demanda que llega en una semana tal que su fase quirúrgica puede ser atendida dentro del horizonte temporal) (*TOTAL DEMANDA 2*) más el total de pacientes que se encontraban en las listas de espera iniciales de las etapas prequirúrgica y quirúrgica (*TOTAL LE2 INICIAL*).
 - o A_3 corresponderá con el número total de pacientes atendidos en la fase postquirúrgica entre la demanda que llega antes de $|H| - e_{12} - e_{23}$ (de nuevo, aquella que llega en una semana tal que su fase postquirúrgica puede ser atendida dentro del horizonte temporal) (*TOTAL DEMANDA 1*) más el total de pacientes que se encontraban en las listas de espera iniciales de las etapas prequirúrgica, quirúrgica y postquirúrgica (*TOTAL LE3 INICIAL*).
- Los términos $ATRLE_1$, $ATRLE_2$ y $ATRLE_3$ hacen referencia al número y al atraso de los pacientes atendidos con atraso que inicialmente se encontraban en las listas de espera de cada etapa, respecto al número total y al atraso máximo de los pacientes que se encontraban en estas listas y que potencialmente podrían haberse atrasado:
 - o $ATRLE_1$ vendrá dado por el número total de pacientes de la lista de espera inicial de la fase prequirúrgica atendidos con atraso multiplicado por el atraso que estos sufren entre el total de pacientes que se encontraba en esas listas iniciales (*MAXIMOS PACIENTES ATRASADOS*

LE_1) multiplicado por el atraso máximo que uno de estos pacientes atrasado podría sufrir (esto es, aquel atraso que experimentaría el paciente con mayor tiempo de espera en las listas iniciales) (*MAXIMO ATRASO LE1*).

- Análogo para $ATRLE_2$ y $ATRLE_3$.
- Los términos ATR_1 , ATR_2 y ATR_3 reflejan el número y el atraso de los pacientes atendidos con atraso que llegan a lo largo de las diferentes semanas del horizonte temporal a cada etapa, respecto al número total y al atraso máximo de estos pacientes que podrían atrasarse. No se incluyen aquí los que se encontraban en las listas de espera iniciales de cada etapa en cuestión al ser ya considerados en $ATRLE_1$, $ATRLE_2$ y $ATRLE_3$, pero sí se tendrá en cuenta que estos pasarán al resto de etapas en las semanas próximas:
 - ATR_1 vendrá dado por el número total de pacientes que llegan a la etapa prequirúrgica a lo largo de las diferentes semanas del horizonte temporal y son atendidos con atraso multiplicado por el atraso correspondiente entre el total de pacientes que llegan a esta etapa (que no pertenecen a la lista de espera inicial de la etapa prequirúrgica) y que potencialmente podrían atrasarse (esto es, toda la demanda que llega hasta $|H| - r_{1i}$) (*MAXIMOS PACIENTES ATRASADOS 1*) multiplicado por el máximo atraso que estos podrían experimentar (esto es, aquel atraso que experimentaría el primer paciente que llega a esta etapa y que no pertenece a la lista de espera de la fase en cuestión) (*MAXIMO ATRASO 1*).
 - ATR_2 será igual al número total de pacientes que llegan a la etapa quirúrgica a lo largo de las diferentes semanas del horizonte temporal y son atendidos con atraso multiplicado por el atraso correspondiente entre el total de pacientes que llegan a esta etapa (que no pertenecen a la lista de espera inicial de la etapa quirúrgica) y que potencialmente podrían atrasarse (esto es, aquella demanda y aquellos pacientes que se encontraban en las listas de espera iniciales de la etapa prequirúrgica que llegan en una semana tal que su fase quirúrgica puede ser atendida dentro del horizonte temporal) (*MAXIMOS PACIENTES ATRASADOS 2*) multiplicado por el máximo atraso que estos podrían experimentar (esto es, aquel atraso que experimentaría el primer paciente que llega a esta etapa y que no pertenece a la lista de espera de la fase en cuestión) (*MAXIMO ATRASO 2*).
 - Análogo para ATR_3 .
- Por último, $NALE_1$, $NALE_2$ y $NALE_3$ hacen referencia a los pacientes no atendidos que pertenecen a las listas de espera iniciales de cada etapa multiplicados por su atraso (H puesto que no son atendidos), mientras que NA_1 , NA_2 y NA_3 reflejan los pacientes sin atender que han llegado a cada etapa y que no pertenecen a su lista de espera inicial, igualmente por su atraso ($|H| - h'$). Estos son los pacientes que habiendo llegado al sistema en una semana concreta no son atendidos en la siguiente etapa dentro del horizonte temporal aun cuando, según la fecha de su llegada, sí podrían haber sido atendidos. Esta consideración es sumamente importante, puesto que, de no buscar la minimización de este número de pacientes, los modelos tratarían de no planificarlos si presentan un atraso muy elevado. Es decir, obviar esta consideración ignoraría estos pacientes, que no serían atendidos ni contabilizados como pacientes atrasados. La normalización de los $NALE_e$ y los NA_e se hace en función del número máximo de pacientes que podrían quedarse sin atender multiplicado por el atraso máximo que podrían experimentar, esto es: las listas de espera totales de cada etapa para cada $NALE_e$ correspondiente por $|H|$ y la suma de las demandas que llegan en semanas tales que pueden ser atendidas en la etapa del NA_e correspondiente más las listas de espera de la etapa anterior por $|H|$.

En cuanto a las restricciones:

- El primer conjunto de restricciones permite agregar las variables desagregadas según las semanas de llegada de los pacientes a la etapa. El número de pacientes de un tipo de intervención planificado con un cirujano en específico para una semana en concreto es la suma de todos los planificados para esa semana, independientemente de la semana en la que llegan a la etapa.
- El segundo, impide que se planifiquen pacientes para semanas anteriores a su llegada a la etapa.
- El conjunto de restricciones 3 garantiza los niveles adecuados de habilidad para realizar el proceso médico-quirúrgico de los pacientes. En otras palabras, impide que se asignen pacientes a cirujanos que

no tienen un nivel de habilidad superior o igual al exigido por el tipo de intervención.

- El cuarto garantiza la disponibilidad de consultas y quirófanos. Impide que se asignen pacientes a la etapa correspondiente cuando se han agotado los recursos físicos.

El conjunto 4.1 asegura que el tiempo total disponible de consulta para una semana determinada sea mayor que el tiempo total que requieren los pacientes asignados para esa semana en las etapas prequirúrgica y postquirúrgica.

De igual forma, el 4.2 asegura que el tiempo total disponible de quirófano para una semana determinada sea mayor que el tiempo total que requieren los pacientes asignados para esa semana en la etapa quirúrgica.

- El siguiente conjunto de restricciones modela los turnos de quirófano y de consulta de cada cirujano.

En consonancia con el conjunto 5.1, cada cirujano puede tener como máximo un total de cinco turnos cada semana. Cabe recordad que el servicio quirúrgico dispone de un número de cirujanos tal que asegura contar con disponibilidad de personal médico en exceso, garantizando siempre que los recursos humanos disponibles sean suficientes para cubrir las consultas y los quirófanos. Además, este exceso de personal permite a los cirujanos realizar otras tareas propias del servicio quirúrgico. No obstante, se otorga prioridad al proceso de AH-MQ para el uso de los turnos de los cirujanos frente a otras tareas, por lo que la disponibilidad máxima cada semana para cada cirujano es de cinco turnos.

Los conjuntos de restricciones 5.2 y 5.3 aseguran que el tiempo total disponible de un cirujano en consulta y en quirófano, respectivamente, para una semana determinada sea mayor que el tiempo total que requieren sus pacientes planificados en las etapas correspondientes.

- El sexto conjunto de restricciones es probablemente el más importante y modela la secuenciación de las etapas.

El conjunto de restricciones 6.1, 6.4 y 6.7 modelan a nivel global dicha secuenciación y asegura que el número de pacientes de un tipo de intervención atendido en una etapa concreta por un cirujano a lo largo de todo el horizonte temporal de planificación sea menor o igual a los pacientes que se encontraban inicialmente en la lista de espera de esa fase más todos aquellos pacientes que llegan a la etapa antes de finalizar el horizonte temporal.

Por otra parte, los conjuntos 6.2, 6.3, 6.5, 6.6, 6.8 y 6.9 se encargan de limitar la planificación a nivel semanal, asegurando que para una semana determinada el número total de pacientes planificados para las semanas posteriores sea menor o igual a los que han llegado a la etapa correspondiente esa semana.

- Posteriormente, los conjuntos de restricciones 7.1 y 7.2 aseguran la participación de un cirujano auxiliar por intervención en la etapa quirúrgica.
- Finalmente, el conjunto de restricciones 8 establece el tipo de las variables.

5.2 Modelo integral de planificación asistencial y gestión del personal

- Conjuntos:

$j \in J$	Conjunto de tipo de recursos
$i \in I$	Conjunto de tipos de intervenciones
$c \in C$	Conjunto de cirujanos
$h \in H$	Conjunto de semanas del horizonte temporal
$e \in E$	Conjunto de etapas

Tabla 7 - Conjuntos del modelo integral de planificación asistencial y gestión del personal

- Parámetros:

a_{jh}	Disponibilidad del tipo de recurso j en la semana h (minutos/turno)
----------	---

t_{ei}	Duración de la etapa e para el tipo de intervención i (minutos)
s_i	Habilidad mínima requerida para tratar a un paciente con tipo de intervención i
s_c	Habilidad del cirujano c
r_{ei}	Tiempo máximo de respuesta de la etapa e para el tipo de intervención i (semanas)
e_{eer}	Tiempo mínimo de espera entre las etapas e y e' (semanas)
n_{turnos}	Número máximo de turnos por semana de cada cirujano
min_{turno}	Minutos por turno
d_{ih}	Demanda del tipo de intervención i en la semana h en la etapa prequirúrgica
$LE1_{inicial_i}$	Lista de espera inicial del tipo de intervención i en la etapa prequirúrgica
$LE2_{inicial_{ich}}$	Lista de espera inicial de la semana h del cirujano c para el tipo de intervención i en la etapa quirúrgica
$LE3_{inicial_{ich}}$	Lista de espera inicial de la semana h del cirujano c para el tipo de intervención i en la etapa postquirúrgica
$TEM1_i$	Tiempo de espera medio de los pacientes en lista de espera del tipo de intervención i en la etapa prequirúrgica
$TEM2_i$	Tiempo de espera medio de los pacientes en lista de espera del tipo de intervención i del cirujano c en la etapa quirúrgica
$TEM3_i$	Tiempo de espera medio de los pacientes en lista de espera del tipo de intervención i del cirujano c en la etapa postquirúrgica
γ_1	Coefficiente de ponderación para los pacientes atendidos
γ_2	Coefficiente de ponderación para los pacientes atrasados
γ_3	Coefficiente de ponderación para los pacientes sin atender
γ_4	Coefficiente de ponderación para el grado de satisfacción de los cirujanos
<i>TOTAL DEMANDA e, TOTAL LEE INICIAL, MAXIMOS PACIENTES ATRASADOS LEE, MAXIMO ATRASO LEE, MAXIMOS PACIENTES ATRASADOS e, MAXIMO ATRASO e, TOTAL LEE, TOTAL DEMANDA e, parámetros auxiliares para la definición de las variables de la función objetivo</i>	

Tabla 8 - Parámetros del modelo integral de planificación asistencial y gestión del personal

- Nuevos parámetros necesarios:

$n_{vacaciones}$	Número de semanas de vacaciones que debe disfrutar un cirujano a lo largo del horizonte temporal
$min_{ocupacion}$	Exceso mínimo de cirujanos disponibles cada semana (%)
$prioridad_{vacaciones_{ch}}$	Prioridad que tienen las vacaciones en la semana h para el cirujano c
$matrimonio_{ch}$	0 si el cirujano c no se encuentra de permiso por matrimonio la semana h 1 si el cirujano c se encuentra de permiso por matrimonio la semana h
$formación_{ch}$	0 si el cirujano c no se encuentra de formación la semana h 1 si el cirujano c se encuentra de formación la semana h
<i>MAXIMA PRIORIDAD, parámetro auxiliar para la definición de la variable GSC</i>	

Tabla 9 - Nuevos parámetros necesarios para el modelo integral de planificación asistencial y gestión del personal

- Variables:

N_{jch}	Número de turnos del tipo de recurso j del cirujano c en la semana h
$X1_{ich'h}$	Número de pacientes con tipo de intervención i que llegan en la semana h' a la etapa prequirúrgica y son planificados para la semana h

$X2_{ich'h}$	Número de pacientes con tipo de intervención i que llegan en la semana h' a la etapa quirúrgica y son planificados para la semana h con el cirujano c
$X3_{ich'h}$	Número de pacientes con tipo de intervención i que llegan en la semana h' a la etapa prequirúrgica y son planificados para la semana h con el cirujano c
$X1_{ich}$	Número de pacientes con tipo de intervención i atendidos por el cirujano c para la semana h en la etapa prequirúrgica
$X2_{ich}$	Número de pacientes con tipo de intervención i atendidos por el cirujano c como principal para la semana h en la etapa quirúrgica
$X2'_{ich}$	Número de pacientes con tipo de intervención i atendidos por el cirujano c como auxiliar para la semana h en la etapa quirúrgica
$X3_{ich}$	Número de pacientes con tipo de intervención i atendidos por el cirujano c para la semana h en la etapa postquirúrgica
V_{ch}	Variable binaria que indica si el cirujano c está de vacaciones la semana h o no
A_e	Pacientes atendidos en la etapa e respecto al total que podrían haber sido atendidos
$ATRLE_e$	Pacientes atendidos con atraso pertenecientes a las listas de espera iniciales de la etapa e respecto al total que, perteneciendo a estas listas, podrían haber sido atendidos con atraso
ATR_e	Pacientes atendidos con atraso que llegan a lo largo de las diferentes semanas del horizonte temporal a la etapa e respecto al total que, sin pertenecer a las listas de espera iniciales, podrían haber sido atendidos con atraso
$NALE_e$	Pacientes no atendidos pertenecientes a las listas de espera iniciales de la etapa e respecto al total que, perteneciendo a estas listas, podrían haber sido no atendidos
NA_e	Pacientes no atendidos que llegan a lo largo de las diferentes semanas del horizonte temporal a la etapa e respecto al total que, sin pertenecer a las listas de espera iniciales, podrían haber sido no atendidos
GSC	Grado de satisfacción de los cirujanos

Tabla 10 - Variables del modelo integral de planificación asistencial y gestión del personal

- Modelo matemático:

$$\text{Max } \gamma_1 \cdot (A_1 + A_2 + A_3) - \gamma_2 \cdot (ATRLE_1 + ATRLE_2 + ATRLE_3 + ATR_1 + ATR_2 + ATR_3) - \gamma_3 \cdot (NALE_1 + NALE_2 + NALE_3 + NA_1 + NA_2 + NA_3) + \gamma_4 \cdot GSC$$

Donde:

$$A_1 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{h \in H} X1_{ich}}{\text{TOTAL DEMANDA 1} + \text{TOTAL LE1 INICIAL}} \quad (0.1)$$

$$A_2 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{h \in H} X2_{ich}}{\text{TOTAL DEMANDA 2} + \text{TOTAL LE2 INICIAL}} \quad (0.2)$$

$$A_3 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{h \in H} X3_{ich}}{\text{TOTAL DEMANDA 3} + \text{TOTAL LE3 INICIAL}} \quad (0.3)$$

$$ATRLE_1 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{\substack{h \in H \\ h > r_{1i} - TEM1_i}} X1_{ic0h} \cdot (h - (r_{1i} - TEM1_i))}{\text{MAXIMOS PACIENTES ATRASADOS LE1} \cdot \text{MAXIMO ATRASO LE1}} \quad (0.4)$$

$$ATRLE_2 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{h' \in e_{12}} \sum_{\substack{h \in H \\ h > r_{2i} - TEM2_i}} X2_{ic0h} \cdot (h - (r_{2i} - TEM2_i))}{\text{MAXIMOS PACIENTES ATRASADOS LE2} \cdot \text{MAXIMO ATRASO LE2}} \quad (0.5)$$

$$ATRLE_3 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{h' \in e_{23}} \sum_{\substack{h \in H \\ h > r_{3i} - TEM3_i}} X3_{ic0h} \cdot (h - (r_{3i} - TEM3_i))}{\text{MAXIMOS PACIENTES ATRASADOS LE3} \cdot \text{MAXIMO ATRASO LE3}} \quad (0.6)$$

$$ATR_1 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{h' \in H} \sum_{\substack{h \in H \\ h' > 1 \\ h > h' + r_{1i}}} X1_{ich'h} \cdot (h - (h' + r_{1i}))}{MAXIMOS PACIENTES ATRASADOS 1 \cdot MAXIMO ATRASO 1} \quad (0.7)$$

$$ATR_2 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{h' \in H} \sum_{\substack{h \in H \\ h' > e_{12} \\ h > h' + e_{12} + r_{2i}}} X2_{ich'h} \cdot (h - (h' + e_{12} + r_{2i}))}{MAXIMOS PACIENTES ATRASADOS 2 \cdot MAXIMO ATRASO 2} \quad (0.8)$$

$$ATR_3 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{h' \in H} \sum_{\substack{h \in H \\ h' > e_{23} \\ h > h' + e_{23} + r_{3i}}} X3_{ich'h} \cdot (h - (h' + e_{23} + r_{3i}))}{MAXIMOS PACIENTES ATRASADOS 3 \cdot MAXIMO ATRASO 3} \quad (0.9)$$

$$NALE_1 = \frac{\sum_{i \in I} (LE1_{inicial_i} - \sum_{c \in C} \sum_{h \in H} X1_{ic0h}) \cdot |H|}{TOTAL LE1 \cdot |H|} \quad (0.10)$$

$$NALE_2 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{h' \in e_{12}} (LE2_{inicial_{ich'}} - \sum_{\substack{h \in H \\ h > h'}} X2_{ich'h}) \cdot |H|}{TOTAL LE2 \cdot |H|} \quad (0.11)$$

$$NALE_3 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{h' \in e_{23}} (LE3_{inicial_{ich'}} - \sum_{\substack{h \in H \\ h > h'}} X3_{ich'h}) \cdot |H|}{TOTAL LE3 \cdot |H|} \quad (0.12)$$

$$NA_1 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{\substack{h' \in H \\ h' > 1}} ((d_{ih'} - \sum_{\substack{h \in H \\ h > h'}} X1_{ich'h})) \cdot (|H| - h')}{TOTAL DEMANDA 1 \cdot |H|} \quad (0.13)$$

$$NA_2 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{\substack{h' \in H \\ h' > e_{12}}} ((X1_{ich'-e_{12}} - \sum_{\substack{h \in H \\ h > h'}} X2_{ich'h})) \cdot (|H| - h')}{(TOTAL DEMANDA 2 + TOTAL LE1) \cdot |H|} \quad (0.14)$$

$$NA_3 = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{\substack{h' \in H \\ h' > e_{23}}} ((X2_{ich'-e_{23}} - \sum_{\substack{h \in H \\ h > h'}} X3_{ich'h})) \cdot (|H| - h')}{(TOTAL DEMANDA 3 + TOTAL LE2) \cdot |H|} \quad (0.15)$$

$$GSC = \frac{\sum_{c \in C} \sum_{h \in H} V_{ch} \cdot \text{prioridad vacaciones}_{ch}}{MAXIMA PRIORIDAD} \quad (0.16)$$

Sujeto a:

$$\sum_{h' \in H} X1_{ich'h} = X1_{ich} \quad \forall i \in I, \forall c \in C, \forall h \in H \quad (1.1)$$

$$\sum_{h' \in H} X2_{ich'h} = X2_{ich} \quad \forall i \in I, \forall c \in C, \forall h \in H \quad (1.2)$$

$$\sum_{h' \in H} X3_{ich'h} = X3_{ich} \quad \forall i \in I, \forall c \in C, \forall h \in H \quad (1.3)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{i \in I} \sum_{\substack{h' \in H \\ h < h'}} X1_{ich'h} = 0 \quad \forall h \in H \quad (2.1)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{i \in I} \sum_{\substack{h' \in H \\ h < h'}} X2_{ich'h} = 0 \quad \forall h \in H \quad (2.2)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{i \in I} \sum_{\substack{h' \in H \\ h < h'}} X3_{ich'h} = 0 \quad \forall h \in H \quad (2.3)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{h \in H} X1_{ich} + X2_{ich} + X2'_{ich} + X3_{ich} = 0 \quad \forall c \in C \mid s_c < s_i \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} X1_{ich} \cdot t_{1i} + X3_{ich} \cdot t_{3i} \leq a_{jh} \quad \forall j \in J, \forall h \in H \mid j = 0 \quad (4.1)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{c \in C} X2_{ich} \cdot t_{2i} \leq a_{jh} \quad \forall j \in J, \forall h \in H \mid j = 1 \quad (4.2)$$

$$\sum_{j \in J} N_{jch} \leq n_{turnos} \cdot (1 - V_{ch}) \quad \forall c \in C, \forall h \in H \mid \text{formación}_{ch} = 0 \text{ y } \text{matrimonio}_{ch} = 0 \quad (5.1)$$

$$N_{jch} \cdot \min_{turno} \geq \sum_{i \in I} X1_{ich} \cdot t_{1i} + X3_{ich} \cdot t_{3i} \quad \forall j \in J, \forall c \in C, \forall h \in H \mid j = 0 \quad (5.2)$$

$$N_{jch} \cdot \min_{turno} \geq \sum_{i \in I} X2_{ich} \cdot t_{2i} + X2'_{ich} \cdot t_{2i} \quad \forall j \in J, \forall c \in C, \forall h \in H \mid j = 1 \quad (5.3)$$

$$\sum_{j \in J} N_{jch} = 0 \quad \forall c \in C, \forall h \in H \mid \text{formación}_{ch} = 1 \text{ ó } \text{matrimonio}_{ch} = 1 \quad (5.4)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{h \in H} X1_{ich} \leq \sum_{h \in H} d_{ih} + LE1_i \quad \forall i \in I \quad (6.1)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{\substack{h \in H \\ h \geq h'}} X1_{ich'h} \leq LE1_i \quad \forall i \in I, \forall h' \in H \mid h' = 0 \quad (6.2)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{\substack{h \in H \\ h \geq h'}} X1_{ich'h} \leq d_{ih'} \quad \forall i \in I, \forall h' \in H \mid h' > 0 \quad (6.3)$$

$$\sum_{h \in H} X2_{ich} \leq \sum_{h \in H - e_{12}} X1_{ich} + \sum_{h \in e_{12}} LE2_{ich} \quad \forall i \in I, \forall c \in C \quad (6.4)$$

$$\sum_{\substack{h \in H \\ h \geq h'}} X2_{ich'h} \leq LE2_{ich'} \quad \forall i \in I, \forall c \in C, \forall h' \in H \mid h' < e_{12} \quad (6.5)$$

$$\sum_{\substack{h \in H \\ h \geq h'}} X2_{ich'h} \leq X1_{ich - e_{12}} \quad \forall i \in I, \forall c \in C, \forall h' \in H \mid h' \geq e_{12} \quad (6.6)$$

$$\sum_{h \in H} X3_{ich} \leq \sum_{h \in H - e_{23}} X2_{ich} + \sum_{h \in e_{23}} LE3_{ich} \quad \forall i \in I, \forall c \in C \quad (6.7)$$

$$\sum_{\substack{h \in H \\ h \geq h'}} X3_{ich'h} \leq LE3_{ich'} \quad \forall i \in I, \forall c \in C, \forall h' \in H \mid h' < e_{23} \quad (6.8)$$

$$\sum_{\substack{h \in H \\ h \geq h'}} X3_{ich'h} \leq X2_{ich - e_{23}} \quad \forall i \in I, \forall c \in C, \forall h' \in H \mid h' \geq e_{23} \quad (6.9)$$

$$\sum_{c \in C} X2_{ich} = \sum_{c \in C} X2'_{ich} \quad \forall i \in I, \forall h \in H \quad (7.1)$$

$$X2'_{ich} \leq \sum_{\substack{c' \in C \\ c' \neq c}} X2_{ic'h} \quad \forall i \in I, \forall c \in C, \forall h \in H \quad (7.2)$$

$$\sum_{h \in H} V_{ch} = n_{vacaciones} \quad \forall c \in C \quad (8.1)$$

$$|C| - \sum_{c \in C} V_{ch} + matrimonio_{ch} + formación_{ch} \geq [(n_{consultas} + 2 \cdot n_{quirófanos}) \cdot min\ ocupacion] \quad \forall h \in H \quad (8.2)$$

$$V_{ch} \leq 1 - matrimonio_{ch} \quad \forall c \in C, \forall h \in H \quad (8.3)$$

$$V_{ch} \leq 1 - formación_{ch} \quad \forall c \in C, \forall h \in H \quad (8.4)$$

$$N_{jch} \geq 0 \quad \forall j \in J, \forall c \in C, \forall h \in H \quad (9.1)$$

$$X1_{ich'h}, X2_{ich'h}, X3_{ich'h} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall c \in C, \forall h' \in H, \forall h \in H \quad (9.2)$$

$$X1_{ich}, X2_{ich}, X2'_{ich}, X3_{ich} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall c \in C, \forall h \in H \quad (9.3)$$

$$A_e, ATRLE_e, ATR_e, PNALE_e, PNA_e \geq 0 \quad \forall e \in E \quad (9.4)$$

$$GSC \geq 0 \quad (9.5)$$

$$V_{ch} \in \{0,1\} \quad \forall c \in C, \forall h \in H \quad (9.6)$$

De nuevo, mostrado el modelo, a continuación, se exponen las aclaraciones y explicaciones necesarias sobre el mismo. El modelo integral de planificación asistencial y gestión del personal parte del primer modelo y comparte en gran medida la misma estructura, variables, restricciones y parámetros que el anterior. No obstante, es preciso comentar las particularidades, los nuevos cambios introducidos y las novedades respecto al otro.

En cuanto a las variables, aparecen un nuevo conjunto:

V_{ch} , variables binarias, relativas a las vacaciones de los cirujanos:

0 si el cirujano c no está de vacaciones la semana h ;

1 si sí lo está

En cuanto a la función objetivo, esta incluye el grado de satisfacción de los cirujanos. GSC representa el número de semanas vacaciones que disfrutan los cirujanos a lo largo del horizonte temporal multiplicado por la prioridad que tienen dichas semanas respecto al máximo grado de satisfacción que se podría teniendo en cuenta el máximo grado de prioridad que los cirujanos pueden establecer (*MAXIMA PRIORIDAD*).

En cuanto a las restricciones:

- Por un lado, el quinto conjunto de restricciones incluye ciertas modificaciones:
 - o El conjunto de restricciones 5.1 ahora asegura que cada cirujano dedique un máximo de cinco turnos de quirófano cada semana, siempre y cuando no se encuentre de vacaciones, de permiso por matrimonio o realizando alguna formación.
 - o Además, el nuevo conjunto 5.4 impide que se asignen pacientes a cirujanos que se encuentran de permiso o formación.
- Por otro, aparecen conjuntos de restricciones adicionales directamente relacionadas con la gestión de las vacaciones:

- El conjunto 8.1 impone que el número total de semanas que un cirujano está de vacaciones a lo largo del horizonte temporal de planificación corresponda con lo establecido en el Estatuto de los Trabajadores (Boletín Oficial del Estado, 2019), asegurando que el número de semanas de vacaciones sea igual a $n_{vacaciones}$, cinco semanas, en ningún caso inferior.
 - El 8.2 garantiza la actividad asistencial de un cierto número mínimo de cirujanos cada semana para cubrir en exceso los recursos físicos, para impedir que se dejen libres consultas y quirófanos y para permitir la realización del resto de tareas del servicio quirúrgico, limitando el número máximo de cirujanos que pueden estar de vacaciones, formaciones o permisos a la vez cada semana.
 - Los conjuntos de restricciones 8.3 y 8.4 impiden que un cirujano esté de vacaciones si ya se encuentra de permiso o realizando una formación, respectivamente.
- Finalmente, el conjunto de restricciones 9 incluye la variable que modela el grado de satisfacción de los cirujanos y establece el tipo de las nuevas variables que modelan las vacaciones.

6 GENERACIÓN DE INSTANCIAS: FACTORES, CONJUNTOS Y PARÁMETROS

En el proceso de evaluación y experimentación de cualquier modelo de programación lineal, la selección de datos de entrada desempeña un papel crucial. Presentados los modelos y analizadas sus variables, funciones objetivos y restricciones, se explica ahora la generación de los factores, conjuntos y parámetros que aparecen en los modelos propuestos y que son fundamentales para el correcto funcionamiento de los mismos. La mayoría son comunes a ambos debido a las grandes similitudes que presentan; no obstante, el modelo integral de planificación asistencial y gestión del personal presenta algunos elementos adicionales que no incluye el básico. Igualmente, son comentados en este apartado.

6.1 Definición de factores

Los factores que se detallan a continuación son usados para calcular el resto de conjuntos y parámetros de los modelos:

$n_{quirófanos}$	Número de quirófanos
$n_{consultas}$	Número de consultas
α	Exceso de disponibilidad de recursos humanos
β	Saturación de la demanda

Tabla 11 - Factores utilizados para la generación de conjuntos y parámetros de los modelos

El número de quirófanos y de consultas, $n_{quirófanos}$ y $n_{consultas}$ respectivamente, experimentará cambios a lo largo de las diferentes pruebas que se harán del modelo. Se estudiarán dos escenarios concretos: 1 quirófano y 2 consulta; 2 quirófanos y 3 consultas.

La elección de estas combinaciones específicas de quirófanos y consultas se justifica siguiendo el enfoque ilustrativo de este estudio. Estas combinaciones representan un compromiso entre representatividad y aplicabilidad práctica, abarcando escenarios reducidos que permiten analizar la planificación hospitalaria en el mundo real.

Los siguientes factores, α y β , establecen el exceso de personal médico sobre el estrictamente necesario para cubrir los recursos y la saturación de la demanda, respectivamente. Por un lado, α refleja el porcentaje de disponibilidades adicional respecto a la disponibilidad mínima de cirujanos necesaria para cubrir los recursos físicos con el que cuenta el servicio quirúrgico. Por otro, β hace referencia a la cantidad de pacientes que requieren atención médica.

Basados en Cañete Yaque (2022), en función del caso a analizar, α y β tomarán estos valores:

	Exceso de disponibilidad	Nivel de demanda
Medio	$\alpha = 150\%$	$\beta = 150\%$
Alto	$\alpha = 200\%$	$\beta = 200\%$

Tabla 12 - Valores de α y β

Dos últimas aclaraciones sobre estos factores:

- $\alpha = 100\%$ implicaría la participación del personal médico mínimamente necesario para cubrir los recursos físicos. Esta consideración impediría otorgar vacaciones, permisos o formaciones a los cirujanos, puesto que una disminución en sus disponibilidades convertiría los recursos humanos en el cuello de botella del sistema incumpliendo el conjunto de restricciones 8.2 y dando lugar a una subutilización indeseada de recursos físicos.

- $\beta = 100\%$ representaría el idílico caso de equilibrio perfecto entre pacientes que llegan al sistema y capacidad de recursos físicos.

6.2 Definición de conjuntos

Por su parte, el tamaño de los conjuntos define las dimensiones de las variables del problema, impactando directamente en su dificultad. A mayor tamaño de conjuntos, mayor número de variables y mayor número de restricciones, traduciéndose en una mayor complejidad computacional y un aumento del tiempo de cálculo.

El conjunto de tipos de recursos J recoge consultas y quirófanos, de modo que:

- $j = 0$, indica consulta
- $j = 1$, quirófano

En cuanto al conjunto de tipos de intervenciones, se considera $I = 3$. El uso de tres tipos de intervenciones proporciona una representación clara y manejable del problema, permitiendo reducir la cantidad de variables y restricciones y facilitar la obtención de soluciones óptimas en un tiempo razonable.

Sin embargo, esta elección no excluye la posibilidad de abordar problemas con un número mayor de tipos de intervenciones en situaciones más complejas. Siguiendo de nuevo el enfoque ilustrativo del problema, la limitación a tres tipos de intervenciones se realiza por conveniencia y simplicidad en este contexto particular, pero podría extenderse a un número mayor si las circunstancias lo requirieren.

El número de cirujanos C es ajustado a las dimensiones del problema, al número de consultas y quirófanos y al exceso de disponibilidades de los cirujanos considerado, de forma cada semana se asegure que el tiempo disponible entre todos los cirujanos cubre el tiempo disponible de consulta y quirófano, teniendo en cuenta que cada turno de quirófano precisa dos cirujanos (principal y auxiliar), y el porcentaje mínimo de exceso de disponibilidades:

$$\text{Tiempo por cirujano} \cdot C \geq (\text{Tiempo de consulta} + 2 \cdot \text{Tiempo de quirófano}) \cdot \text{min ocupacion}$$

Dado que:

$$\text{Tiempo por cirujano} = \min_{\text{turno}} \cdot n_{\text{turnos}}$$

$$\text{Tiempo de consulta} = \min_{\text{turno}} \cdot n_{\text{consultas}} \cdot n_{\text{turnos}}$$

$$\text{Tiempo de quirófano} = \min_{\text{turno}} \cdot n_{\text{quirófanos}} \cdot n_{\text{turnos}}$$

Y que, como se verá más adelante:

$$\alpha > \text{min ocupacion}$$

C es finalmente determinado según la siguiente expresión:

$$C = (n_{\text{consultas}} + 2 \cdot n_{\text{quirófanos}}) \cdot \alpha > (\text{Tiempo de consulta} + 2 \cdot \text{Tiempo de quirófano}) \cdot \text{min ocupacion}$$

El conjunto H representa las semanas del horizonte temporal de planificación. Al tratarse de una planificación anual, $|H| = 52$ semanas.

Por último, las diferentes etapas del proceso médico-quirúrgico quedan recogidas en el conjunto de etapas E :

- $e = 1$ etapa prequirúrgica.
- $e = 2$, etapa quirúrgica.
- $e = 3$, prequirúrgica.

6.3 Definición de parámetros

Igualmente, los parámetros que aparecen en ambos modelos también influyen en la resolución del problema. Siguiendo la misma línea que hasta ahora, se detalla a continuación cómo estos son generados y los valores que

toman.

Cada semana, la disponibilidad de las consultas y los quirófanos a_{jh} se calcula de la siguiente forma:

$$a_{jh} = \min_{turno} \cdot n_{consultas} \cdot n_{turnos} \quad \text{si } j = 0$$

$$a_{jh} = \min_{turno} \cdot n_{quirófanos} \cdot n_{turnos} \quad \text{si } j = 1$$

En principio, todas las semanas tienen la misma disponibilidad de consultas y quirófanos, pero, excepcionalmente, existe una pequeña probabilidad del 12.5% de que esta baje (motivado por los imprevistos que puedan impedir el uso de una consulta y un quirófano una semana concreta).

Basados en la experimentación de Cañete Yaque (2022), los tiempos de los diferentes tipos de intervención asociados a cada etapa son asignados de la siguiente forma:

- t_{1i} es generado aleatoriamente entre 18 y 36 minutos
- t_{2i} toma uno de los siguientes valores: 60, 120, 180 o 240 minutos
- t_{3i} es generado de igual forma que t_{1i}

Los niveles de habilidad s_i de cada tipo de intervención son generados aleatoriamente entre 0 y 50. De igual forma, los niveles de habilidad de cada cirujano s_c varían entre 35 y 100.

Basados en Cañete Yaque (2022), los tiempos máximos de respuesta de cada fase para los diferentes tipos de intervención, es decir, el número máximo de semanas en el que un paciente ha de ser atendido tras su llegada a la etapa se determinan así:

- Entre la llegada del paciente al proceso médico-quirúrgico y la asignación de un cirujano para su etapa prequirúrgica, el tiempo máximo de respuesta r_{1i} varía entre 4 y 6 semanas para cada tipo de intervención.
- Entre las etapas prequirúrgica y quirúrgica r_{2i} toma los siguientes valores: 6, 25 o 52 semanas según el tipo de intervención.
- Entre la quirúrgica y la postquirúrgica r_{3i} se sitúa entre 4 y 6 semanas.

Por último, las semanas de espera mínima entre las etapas prequirúrgica y quirúrgica e_{12} oscilan entre 1 y 3 semanas, comunes para todos los tipos de intervención, mientras que entre las quirúrgicas y postquirúrgicas e_{23} lo hacen entre 4 y 6.

Por otra parte, siguiendo la explicación de los aspectos particulares del problema, la disponibilidad máxima de turnos por semana de cada cirujano, n_{turnos} , es cinco, otorgando prioridad de turnos al proceso de AH-MQ. Se consideran turnos de ocho horas, \min_{turno} , para quirófano y para consulta.

La definición de los siguientes parámetros del modelo es algo más compleja que los factores, conjuntos y parámetros vistos hasta ahora y precisa una explicación más detallada.

Los primeros pacientes que llegan al sistema en $h = 0$ provienen de $LE1_{inicial_i}$, por lo que idílicamente pasarán a la segunda etapa en $h = e_{12}$ y a la tercera en $h = e_{12} + e_{23}$. Los pacientes atendidos en estas etapas hasta la llegada de los que se encontraban en la $LE1_{inicial_i}$ dan lugar a las $LE2_{inicial_{ih}}$ y $LE3_{inicial_{ih}}$ de las fases correspondientes. Se generará entonces:

- $LE1_{inicial_i}$ hasta $h < 1$.
- $LE2_{inicial_{ih}}$ hasta $h < e_{12}$, puesto que en $h = e_{12}$ llegan a la etapa quirúrgica los pacientes pertenecientes a la $LE1_{inicial_i}$.
- $LE3_{inicial_{ih}}$ hasta $h < e_{23}$, puesto que en $h = e_{23}$ llegan a la etapa postquirúrgica los pacientes de la $LE2_{inicial_{i0}}$.

Una vez $h \geq 1$ comienza a llegar nueva demanda a la etapa prequirúrgica del sistema.

Adicionalmente, para la correcta generación de la demanda y las listas de espera es crucial tener en consideración que, idealmente:

- Como se comentó antes, los pacientes de las $LE1_{inicial_i}$:

- Serán atendidos en la semana $h = 0$ en la etapa prequirúrgica.
- Pasarán a la etapa quirúrgica en $h = e_{12}$.
- Y posteriormente a la postquirúrgica en $h = e_{12} + e_{23}$.
- Los pacientes de las $LE2$ inicial $_{ih}$:
 - Serán atendidos en la semana h en la etapa quirúrgica.
 - Y pasarán a la etapa postquirúrgica en $h + e_{23}$.
- Los pacientes de las $LE3$ inicial $_{ih}$:
 - Solo serán atendidos en la semana h en la etapa postquirúrgica.
- Y la demanda generada en una semana h cualquiera:
 - Será atendida en esa semana h en la etapa prequirúrgica.
 - Pasará a la etapa quirúrgica en $h + e_{12}$.
 - Y posteriormente a la postquirúrgica en $h + e_{12} + e_{23}$.

Para aclarar estas ideas, se muestra un pequeño ejemplo para $H = 8$, $e_{12} = 2$ y $e_{23} = 4$:

h	0	1	2	3	4	5	6	7
E1	LE1 inicial $_i$	d_{i1}	d_{i2}	d_{i3}	d_{i4}	d_{i5}	d_{i6}	d_{i7}
E2	LE2 inicial $_{i0}$	LE2 inicial $_{i1}$	LE1 inicial $_i$	d_{i1}	d_{i2}	d_{i3}	d_{i4}	d_{i5}
E3	LE3 inicial $_{i0}$	LE3 inicial $_{i1}$	LE3 inicial $_{i2}$	LE3 inicial $_{i3}$	LE2 inicial $_{i0}$	LE2 inicial $_{i1}$	LE1 inicial $_i$	d_{i0}
	$0 \leq h < 1$	$1 \leq h < e_{12}$	$e_{12} \leq h < e_{23}$		$h \geq e_{23}$			

Tabla 13 - Ejemplo de planificación ideal de la demanda y listas de espera iniciales

Presentadas todas estas aclaraciones iniciales, se detalla ahora el proceso en sí de generación de demanda y listas de espera iniciales.

En general, la demanda y las listas de espera son generadas hasta saturar los recursos disponibles de consulta o quirófano la semana que corresponda teniendo en cuenta el nivel de saturación de la demanda, es decir, son generadas mientras el tiempo requerido para la atención de esos pacientes, *tiempo proceso consulta $_h$* y *tiempo proceso quirófano $_h$* , sea menor que la disponibilidad de los recursos en la semana correspondiente por β .

La demanda generada a lo largo de las diferentes semanas del horizonte temporal requerirá los siguientes tiempos disponibles en los siguientes recursos:

- t_{1i} en consulta la semana h (necesario para la atención de la primera etapa).
- t_{2i} en quirófano la semana $h + e_{12}$ (necesario para la atención de la segunda etapa).
- t_{3i} en consulta la semana $h + e_{12} + e_{23}$ (necesario para la atención de la tercera etapa).

No obstante, también se debe tener en cuenta que los pacientes pertenecientes a las listas de espera iniciales de las etapas prequirúrgica, quirúrgica y postquirúrgica requerirán igualmente ciertos tiempos disponibles de consulta y quirófano para ser atendidos; y lo harán también conforme avancen de etapa según lo expuesto anteriormente.

Por ello, es necesario determinar de la demanda semanal de cada tipo de intervención de forma conjunta a la creación de las listas de espera iniciales de cada etapa:

Para cada $h \in H$:

Si $0 \leq h < 1$:

Mientras $\text{tiempo proceso consulta}_h \leq a_{0h} \cdot \beta$ y

$\text{tiempo proceso quirófano}_{h+e_{12}} \leq a_{1h+e_{12}} \cdot \beta$ y

$$\text{tiempo proceso consulta}_{h+e_{12}+e_{23}} \leq a_{0h+e_{12}+e_{23}} \cdot \beta$$

Se toma aleatoriamente un tipo de intervención i

$$LE1\ inicial_i = LE1\ inicial_i + 1$$

$$\text{tiempo proceso consulta}_h = \text{tiempo proceso consulta}_h + t_{1i}$$

$$\text{tiempo proceso quirófano}_{h+e_{12}} = \text{tiempo proceso quirófano}_{h+e_{12}} + t_{2i}$$

$$\text{tiempo proceso consulta}_{h+e_{12}+e_{23}} = \text{tiempo proceso consulta}_{h+e_{12}+e_{23}} + t_{3i}$$

Si tiempo proceso consulta_h > a_{0h} · β ó

$$\text{tiempo proceso quirófano}_{h+e_{12}} > a_{1h+e_{12}} \cdot \beta \text{ ó}$$

$$\text{tiempo proceso consulta}_{h+e_{12}+e_{23}} > a_{0h+e_{12}+e_{23}} \cdot \beta$$

$$LE1\ inicial_i = LE1\ inicial_i - 1$$

fin

$$LE3\ inicial_{ih} = LE3\ inicial_{ih} + 1$$

$$\text{tiempo proceso consulta}_h = \text{tiempo proceso consulta}_h + t_{3i}$$

Si tiempo proceso consulta_h > a_{0h} · β

$$LE3\ inicial_{ih} = LE3\ inicial_{ih} - 1$$

fin

Mientras tiempo proceso quirofano_h ≤ a_{1h} · β y

$$\text{tiempo proceso consulta}_{h+e_{23}} \leq a_{0h+e_{23}} \cdot \beta$$

Se toma aleatoriamente un tipo de intervención i

$$LE2\ inicial_{ih} = LE2\ inicial_{ih} + 1$$

$$\text{tiempo proceso quirófano}_h = \text{tiempo proceso quirófano}_h + t_{2i}$$

$$\text{tiempo proceso consulta}_{h+e_{23}} = \text{tiempo proceso consulta}_{h+e_{23}} + t_{3i}$$

Si tiempo proceso quirofano_h > a_{1h} · β ó

$$\text{tiempo proceso consulta}_{h+e_{23}} > a_{0h+e_{23}} \cdot \beta$$

$$LE2\ inicial_i = LE2\ inicial_i - 1$$

fin

Si $1 \leq h < e_{12}$:

Mientras tiempo proceso consulta_h ≤ a_{0h} · β y

$$\text{tiempo proceso quirófano}_{h+e_{12}} \leq a_{1h+e_{12}} \cdot \beta \text{ y}$$

$$\text{tiempo proceso consulta}_{h+e_{12}+e_{23}} \leq a_{0h+e_{12}+e_{23}} \cdot \beta$$

Se toma aleatoriamente un tipo de intervención i

$$d_{ih} = d_{ih} + 1$$

$$\text{tiempo proceso consulta}_h = \text{tiempo proceso consulta}_h + t_{1i}$$

$$\text{tiempo proceso quirófano}_{h+e_{12}} = \text{tiempo proceso quirófano}_{h+e_{12}} + t_{2i}$$

$$\text{tiempo proceso consulta}_{h+e_{12}+e_{23}} = \text{tiempo proceso consulta}_{h+e_{12}+e_{23}} + t_{3i}$$

Si tiempo proceso consulta_h > a_{0h} · β ó

tiempo proceso quirófano $_{h+e_{12}} > a_{1h+e_{12}} \cdot \beta$ ó

tiempo proceso consulta $_{h+e_{12}+e_{23}} > a_{0h+e_{12}+e_{23}} \cdot \beta$

$$d_{ih} = d_{ih} - 1$$

fin

$$LE3\ inicial_{ih} = LE3\ inicial_{ih} + 1$$

$$tiempo\ proceso\ consulta_h = tiempo\ proceso\ consulta_h + t_{3i}$$

Si tiempo proceso consulta $_h > a_{0h} \cdot \beta$

$$LE3\ inicial_{ih} = LE3\ inicial_{ih} - 1$$

fin

Mientras tiempo proceso quirofano $_h \leq a_{1h} \cdot \beta$ y

tiempo proceso consulta $_{h+e_{23}} \leq a_{0h+e_{23}} \cdot \beta$

Se toma aleatoriamente un tipo de intervención i

$$LE2\ inicial_{ih} = LE2\ inicial_{ih} + 1$$

$$tiempo\ proceso\ quirófano_h = tiempo\ proceso\ quirófano_h + t_{2i}$$

$$tiempo\ proceso\ consulta_{h+e_{23}} = tiempo\ proceso\ consulta_{h+e_{23}} + t_{3i}$$

Si tiempo proceso quirofano $_h > a_{1h} \cdot \beta$ ó

tiempo proceso consulta $_{h+e_{23}} > a_{0h+e_{23}} \cdot \beta$

$$LE2\ inicial_i = LE2\ inicial_i - 1$$

fin

Si $e_{12} \leq h < e_{23}$:

Mientras tiempo proceso consulta $_h \leq a_{0h} \cdot \beta$ y

tiempo proceso quirófano $_{h+e_{12}} \leq a_{1h+e_{12}} \cdot \beta$ y

tiempo proceso consulta $_{h+e_{12}+e_{23}} \leq a_{0h+e_{12}+e_{23}} \cdot \beta$

Se toma aleatoriamente un tipo de intervención i

$$d_{ih} = d_{ih} + 1$$

$$tiempo\ proceso\ consulta_h = tiempo\ proceso\ consulta_h + t_{1i}$$

$$tiempo\ proceso\ quirófano_{h+e_{12}} = tiempo\ proceso\ quirófano_{h+e_{12}} + t_{2i}$$

$$tiempo\ proceso\ consulta_{h+e_{12}+e_{23}} = tiempo\ proceso\ consulta_{h+e_{12}+e_{23}} + t_{3i}$$

Si tiempo proceso consulta $_h > a_{0h} \cdot \beta$ ó

tiempo proceso quirófano $_{h+e_{12}} > a_{1h+e_{12}} \cdot \beta$ ó

tiempo proceso consulta $_{h+e_{12}+e_{23}} > a_{0h+e_{12}+e_{23}} \cdot \beta$

$$d_{ih} = d_{ih} - 1$$

fin

$$LE3\ inicial_{ih} = LE3\ inicial_{ih} + 1$$

$$tiempo\ proceso\ consulta_h = tiempo\ proceso\ consulta_h + t_{3i}$$

Si tiempo proceso consulta $_h > a_{0h} \cdot \beta$

$$LE3\ inicial_{ih} = LE3\ inicial_{ih} - 1$$

fin

Si $h \geq e_{23}$:

Mientras tiempo proceso consulta $_h \leq a_{0h} \cdot \beta$ y

tiempo proceso quirófano $_{h+e_{12}} \leq a_{1h+e_{12}} \cdot \beta$ y

tiempo proceso consulta $_{h+e_{12}+e_{23}} \leq a_{0h+e_{12}+e_{23}} \cdot \beta$

Se toma aleatoriamente un tipo de intervención i

$$d_{ih} = d_{ih} + 1$$

$$\text{tiempo proceso consulta}_h = \text{tiempo proceso consulta}_h + t_{1i}$$

$$\text{tiempo proceso quirófano}_{h+e_{12}} = \text{tiempo proceso quirófano}_{h+e_{12}} + t_{2i}$$

$$\text{tiempo proceso consulta}_{h+e_{12}+e_{23}} = \text{tiempo proceso consulta}_{h+e_{12}+e_{23}} + t_{3i}$$

Si tiempo proceso consulta $_h > a_{0h} \cdot \beta$ ó

tiempo proceso quirófano $_{h+e_{12}} > a_{1h+e_{12}} \cdot \beta$ ó

tiempo proceso consulta $_{h+e_{12}+e_{23}} > a_{0h+e_{12}+e_{23}} \cdot \beta$

$$d_{ih} = d_{ih} - 1$$

fin

En resumen y en consonancia con lo planteado al inicio de este subapartado:

- Para $0 \leq h < 1$, se genera $LE1$ inicial $_i$, $LE2$ inicial $_{ih}$ y $LE3$ inicial $_{ih}$.
- Para $1 \leq h < e_{12}$, se genera d_{ih} , $LE2$ inicial $_{ih}$ y $LE3$ inicial $_{ih}$.
- Para $e_{12} \leq h < e_{23}$, se genera d_{ih} y $LE3$ inicial $_{ih}$.
- Para $h \geq e_{23}$, se genera d_{ih} .

Una vez generadas las listas de espera iniciales totales de las etapas quirúrgica y postquirúrgica para las semanas correspondientes, se distribuyen entre los diferentes cirujanos de forma aleatoria (siempre asegurando que el nivel de habilidad del cirujano sea igual o superior al requerido por el tipo de intervención), dando lugar finalmente a los datos $LE2$ inicial $_{ich}$ y $LE3$ inicial $_{ich}$ que aparecen en ambos modelos.

Además, los pacientes que se encuentran en estas listas de espera iniciales cuentan con un número de semanas asociado, generado de forma aleatoria entre 0 y $r_{ei} - 1$ semanas, que representa el tiempo que llevan esperando en estas listas. Mediante estos, se calcula el tiempo de espera medio de las listas de espera iniciales de las etapas prequirúrgica, quirúrgica y postquirúrgica, $TEM1_i$, $TEM2$ y $TEM3_i$ respectivamente, como el número medio de semanas que estos pacientes llevan manteniéndose a la espera.

Por otro lado, en el modelo integral de planificación asistencial y gestión del personal aparecen, además, nuevos parámetros independientes de los vistos hasta ahora, cuyas definiciones igualmente se detallan a continuación.

El parámetro *min ocupación* hace referencia al número mínimo de cirujanos que debe realizar actividad asistencial cada semana para cubrir los recursos físicos en exceso y permitir cubrir otras tareas, asegurando que el número de cirujanos disponibles es al menos $[min\ ocupación \cdot (n_{consultas} + 2 \cdot n_{quirófanos})]$. Considerando los valores de α y β estudiados, *min ocupación* es fijado en un 125%:

Consultas	Quirófanos	Cir. mínimos para cubrir recursos	Cir. mínimos requeridos	$\alpha = 150\%$		$\alpha = 200\%$	
				Cir. disponibles	Máx. cir. ausentes	Cir. disponibles	Máx. cir. ausentes
2	1	4	5	6	1	8	3
3	2	7	8	10	2	14	6

Tabla 14 - Cirujanos mínimos requeridos, disponibles y máximos posibles ausentes al mismo tiempo

En definitiva, este porcentaje establece el número máximo de cirujanos que pueden estar ausentes simultáneamente, sin realizar actividad asistencial, cada semana, en función del número de cirujanos disponibles y del número mínimo de cirujanos requeridos para cubrir los recursos físicos.

En cuanto a las vacaciones, el número de semanas de vacaciones que un cirujano debe disfrutar obligatoriamente a lo largo del horizonte temporal de planificación, $n_{vacaciones}$, son cinco según los 30 días naturales establecidos en el Estatuto de los Trabajadores (Boletín Oficial del Estado, 2019). Además, la preferencia de los cirujanos para seleccionar una semana de vacaciones en contraposición a otra, $prioridad\ vacaciones_{ch}$, se establece de forma aleatoria en función de las festividades del año:

- Temporada de Navidad: de la semana 50 a la 2, toman valores entre 8 y 10
- Temporada de Semana Santa: de la semana 12 a la 14, toman valores entre 4 y 7
- Temporada de verano: de la semana 25 a la 37, toman valores entre 6 y 10
- Temporada sin festividades: resto de semanas del año, toman valores entre 0 y 3.

Así, cada cirujano muestra un nivel de prioridad para cada semana dentro del horizonte temporal.

En cuanto a los permisos, el Estatuto de los Trabajadores (Boletín Oficial del Estado, 2019) establece que el empleado tiene derecho a quince días naturales de permiso en caso de matrimonio, esto es 2 semanas. Para modelar esta situación, se ha tomado la tasa de bruta de nupcialidad en España. Según datosmacro.com (s. f.), para 2021 esta tasa fue del 3.12%. Siguiendo esta información, se considera que la probabilidad de que un cirujano se case en el horizonte de planificación y que por tanto solicite un permiso por matrimonio es del 3%. De este modo, cada semana existe una pequeña probabilidad de 0.03/52 de que un cirujano solicite dicho permiso. En caso de que se dé esta probabilidad en una semana h , el cirujano no realizará actividad asistencial esa semana ni la siguiente, $matrimonio_{ch} = 1$ y $matrimonio_{ch+1} = 1$. Además, una vez disfrutado este permiso, el cirujano no podrá solicitarlo de nuevo.

Como se detalló anteriormente, para el escenario que considera 1 quirófano y 2 consultas el número máximo de cirujanos que pueden estar sin realizar actividad asistencial al mismo tiempo para seguir cumpliendo las restricciones y asegurar la disponibilidad mínima de cirujanos impuesta por $min\ ocupación$ es 1 para los casos en los que $\alpha = 150\%$. Sin pérdida de generalidad y puesto que tanto los permisos por matrimonio como las formaciones de los cirujanos se consideran conocidas al inicio del horizonte temporal y no forman parte del nivel de decisión, se considerará que en el número máximo de cirujanos que disfrutaron de permisos por matrimonio o realizan formaciones médicas simultáneamente a lo largo del año de planificación es 1 para cualquier caso y escenario.

En el mundo real, podrían darse situaciones en las que no se puedan obtener soluciones factibles porque no se cumpla esta consideración. No obstante, justificado por el carácter de este estudio se incluye esta consideración para poder alcanzar soluciones en cualquier caso y escenario y poder analizar todos los resultados.

Los permisos por matrimonio concedidos a los cirujanos a lo largo del horizonte temporal son determinados así:

Para cada $h \in H$:

Para cada $c \in C$:

Si $a_c = 0$ y $b_h = 0$:

p toma aleatoriamente un valor entre 1 y 5200

Si $p < 4$:

$$matrimonio_{ch} = 1$$

$$matrimonio_{ch+1} = 1$$

$$a_c = 1$$

$$b_h = 1$$

$$b_{h+1} = 1$$

fin

Si no:

$$\text{matrimonio}_{ch} = 0$$

Donde a_c indica si el cirujano c ya ha solicitado el permiso por matrimonio durante el horizonte temporal o no; y b_h , si algún cirujano se encuentra realizando ya permiso por matrimonio esa misma semana.

En cuanto a las formaciones, según la Fundación Estatal para la formación en el empleo (2021), “el 9.2% de los participantes del perfil formativo del sector servicios, concretamente de actividades sanitarias y de servicios sociales, fueron formados en el año 2021”. Siguiendo esto, existe una pequeña probabilidad de 0.09/52 de que un cirujano solicite realizar una formación cada semana. En caso de que se dé esta probabilidad en una semana h , la formación del cirujano es aprobada si no existen otras formaciones ni otros permisos por matrimonio programados para las semanas que dura la formación, duración generada de forma aleatoria entre 1 y 4 semanas. Una vez solicitada la formación, no puede volver a hacerlo de nuevo.

Para cada $h \in H$:

Para cada $c \in C$:

$$\text{aux} = 0$$

Si $j_c = 0$ y $k_h = 0$:

p toma aleatoriamente un valor entre 1 y 5200

Si $p < 10$:

$\text{duración formación}_{ch}$ toma aleatoriamente un valor seleccionado de $\{1,2,3,4\}$

$$j_c = 1$$

Para cada $i \in \text{duración formación}_{ch}$:

$$\text{aux} = \text{aux} + b_{h+i}$$

Si $\text{aux} = 0$:

Para $i \in (h, h + \text{duración formación}_{ch})$:

$$\text{formación}_{ci} = 1$$

$$k_i = 1$$

fin

Si no:

$$\text{formación}_{ch} = 0$$

Si no:

$$\text{formación}_{ch} = 0$$

Donde, de forma análoga, j_c indica si el cirujano c ya ha solicitado realizar una formación durante el horizonte temporal o no; y k_h , si algún cirujano se encuentra realizando ya alguna formación o no esa misma semana. aux es usado para comprobar al mismo tiempo si algún cirujano está ausente por matrimonio las semanas que dura la formación. Para la generación de los permisos por matrimonio no fue necesario incluir la comprobación contraria, es decir, comprobar si algún cirujano se encuentra ya realizando formación una semana concreta para determinar los permisos por matrimonio puesto que la generación de matrimonio_{ch} es anterior a la de formación_{ch} .

Por último, se muestran a continuación los coeficientes de ponderación presentes en las funciones objetivos de ambos modelos. Estos toman valores diferentes en cada caso:

	Modelo básico	Modelo integral
γ_1	100	95
γ_2	25	25
γ_3	25	25
γ_4	-	5

Tabla 15 - Valores de los coeficientes de ponderación para cada modelo

Otras políticas de gestión podrían modificar estos valores; no obstante, sin pérdida de generalidad se han establecido estos coeficientes para obtener valores de las funciones objetivos fácilmente valorables en una escala del 0 al 100.

7 EXPERIMENTACIÓN

A continuación, se aborda el proceso de experimentación de los modelos desarrollados. Se presenta el entorno sobre el que se ha realizado la implementación de los modelos, la metodología y el *solver* usados para la optimización. Además, se describen los diferentes casos estudiados y los indicadores de interés utilizados para evaluar el desempeño de los modelos en cada caso. Finalmente, se profundiza en el análisis de las soluciones alcanzadas, proporcionando una visión integral de la eficacia de los modelos propuestos.

7.1 Implementación del modelo

La validación de los modelos matemáticos propuestos a través del uso de softwares de optimización es un paso crítico en el desarrollo de los mismos. En este sentido, ambos modelos han sido implementados y puestos a prueba en el entorno de programación Python haciendo uso de la biblioteca MIP (Mixed-Integer Linear Programming).

Python destaca por su versatilidad y sencillez de uso, facilitando una implementación rápida y eficaz de los modelos, por lo que se presenta como una opción ideal para llevar a cabo esta experimentación. Además, ofrece una amplia gama de bibliotecas y recursos que facilitan el desarrollo y la depuración del código.

Justamente, según Python-MIP documentation (s. f.), “el paquete Python-MIP proporciona herramientas para modelar y resolver problemas de programación lineal entera mixta (MIP) en Python. En la capa de modelado, los modelos pueden escribirse de forma muy concisa, como ocurre en los lenguajes de programación matemática de alto nivel”.

“La instalación predeterminada incluye COIN-OR Linear Programming (CLP), que es en la actualidad el *solver* de programación lineal de código abierto más rápido. También funciona con el *solver* Gurobi de última generación” (Python-MIP documentation, s. f.).

No obstante, el proceso de experimentación de los modelos ha sido realizado con “el *solver* COIN-OR Branch and Cut COIN-OR (CBC), un *solver* MIP altamente configurable” (CBC user’s guide, s.f.), también instalado por defecto. CBC user’s guide (s.f.) explica que “el *solver* COIN-OR Branch and Cut (CBC) es un *solver* de programación entera mixta (MIP) de código abierto escrito en C++. CBC es diseñado para usarlo principalmente como una biblioteca invocable para crear *solvers* de ramificación y corte personalizados”.

Como se mencionó antes, CBC es altamente configurable y sus parámetros pueden ser ajustados para proporcionar soluciones aproximadas en un tiempo razonable en caso de no encontrar las óptimas. En este sentido:

- El tiempo máximo de resolución se ha limitado a dos horas para permitir llevar a cabo una amplia variedad de pruebas en un período de tiempo razonable. La optimización involucra un equilibrio entre la precisión de la solución alcanzada y el tiempo necesario para obtenerla. Limitar el tiempo de resolución permite encontrar soluciones de alta calidad en la mayoría de los casos, sin comprometer significativamente la eficiencia de la experimentación.
- Igualmente, se ha cambiado la configuración del número de *threads* que se utilizan para agilizar y facilitar la optimización y se ha optado por fijarlo a dos. “0 utiliza la configuración predeterminada del *solver*, -1 utiliza el número de núcleos de procesamiento disponibles y ≥ 1 usa el número de *threads* especificado. Un mayor número de *threads* puede mejorar el tiempo de solución, pero también incrementa el consumo de la memoria” (Python-MIP documentation, s. f.).

Todo el código necesario desarrollado para la implementación de los modelos asistencial y asistencial y gestión del personal aparecen adjuntos en los Anexos.

7.2 Casos estudiados

Para evaluar de manera exhaustiva los modelos propuestos durante la fase de experimentación en Python y alcanzar resultados de interés, se evaluarán todas las posibles combinaciones de α y β propuestas para cada uno de los escenarios planteados. Así, los casos estudiados serán los siguientes:

		α	β	I	C	Máx. C ausentes	H
Escenario 1: 1 quirófano/ 2 consultas	Caso 0	150%	150%	3	6	1	52
	Caso 1	150%	200%	3	6	1	52
	Caso 2	200%	150%	3	8	3	52
	Caso 3	200%	200%	3	8	3	52
Escenario 2: 2 quirófanos/ 3 consultas	Caso 0	150%	150%	3	10	2	52
	Caso 1	150%	200%	3	10	2	52
	Caso 2	200%	150%	3	14	6	52
	Caso 3	200%	200%	3	14	6	52

Tabla 16 - Resumen de casos estudiados

Las diferentes combinaciones planteadas serán evaluadas a través de los dos modelos desarrollados en este Trabajo Fin de Grado con cinco semillas diferentes para obtener soluciones más confiables, considerar la variabilidad y la incertidumbre de los parámetros y reducir sesgos, garantizando que los resultados no sean casuales y ayudando a revelar tendencias generales. Esto permitirá en el posterior análisis de los resultados determinar el impacto de la gestión de las vacaciones, permisos y formaciones del personal sanitario en la planificación del proceso de AH-MQ y, en última instancia, en la atención de los pacientes. Además, el estudio de las soluciones alcanzadas por el segundo modelo permitirá también examinar la evolución del grado de satisfacción de los cirujanos en función del caso estudiado.

Para contextualizar la magnitud de los problemas considerados, se presenta a continuación un resumen de la demanda total que llega al proceso de AH-MQ a lo largo del horizonte de planificación y del tamaño de las listas de espera iniciales en su conjunto, para cada escenario, semilla y caso considerado:

		$\beta = 150\%$ (Casos 0 y 2)		$\beta = 200\%$ (Casos 1 y 3)	
		Demanda total	LE inicial total	Demanda total	LE inicial total
Escenario 1	Semilla – 30	1453	182	1958	242
	Semilla – 80	1266	231	1700	310
	Semilla – 210	783	126	1055	167
	Semilla – 250	888	116	1196	156
	Semilla – 350	1290	176	1726	237
Escenario 2	Semilla – 30	2529	347	3378	447
	Semilla – 80	2538	297	3384	396
	Semilla – 210	1765	218	2361	292
	Semilla – 250	3617	502	4822	667
	Semilla – 350	3635	598	4847	800

Tabla 17 - Tamaño de los problemas considerados

Expuesto todo lo anterior, es esencial resaltar que, con el objetivo de llevar a cabo posteriormente un correcto análisis de las soluciones alcanzadas, se mantienen constantes todos los parámetros y datos relativos a los tipos de intervención y al personal médico en aquellos casos en los que se incrementa el exceso de disponibilidad de recursos humanos sin que se produzcan cambios en el nivel de demanda. Igualmente, se asegura esto para los casos complementarios, en los que aumenta el nivel de saturación de la demanda sin variar el exceso de

disponibilidad de cirujanos.

Esta consideración reviste una importancia fundamental debido a que, si se modificaran las características de las intervenciones o de los cirujanos, particularmente en términos de tiempos de intervención, tiempos máximos de respuesta entre etapas, tiempos de espera mínimo entre fases, niveles de habilidad, prioridad de vacaciones... se invalidaría la base para la comparación. En otras palabras, cualquier variación en estos parámetros daría lugar a soluciones que carecerían de valor, ya que se estaría evaluando el desempeño de los modelos bajo condiciones de partida distintas en cada caso. Por consiguiente, mantener constantes estas características garantiza la validez y la integridad de las comparaciones que se realizarán posteriormente entre los diferentes casos y sus respectivas soluciones.

Para conseguir esto, se empleará la función `numpy.random.default_rng(seed)` para el proceso de generación de parámetros y datos esenciales para el modelo. Esta función forma parte de la biblioteca NumPy, ampliamente utilizada para realizar cálculos numéricos en Python y crea un generador de números aleatorios a partir de una semilla específica, produciendo a partir de ella una secuencia de números completamente determinista y reproducible. En caso de utilizar la misma semilla, la secuencia de números aleatorios generados cada vez que se ejecute el programa es la misma, lo que permite asegurar que ambos modelos serán comparados bajo las mismas condiciones siempre que las semillas sean iguales.

Los parámetros y datos esenciales que alimentan los modelos serán generados de manera aleatoria siguiendo la metodología detallada en el apartado anterior, teniendo en cuenta esta particularidad.

En definitiva, el conjunto de casos contemplados a través de los escenarios y casos planteados permitirán garantizar la adaptabilidad de los modelos a diferentes realidades hospitalarias.

7.3 Soluciones generadas

El código de Python desarrollado para la implementación y validación de los modelos incluye adicionalmente la generación de una tabla resumen en la que se reúnen una serie de parámetros y datos claves que permiten identificar claramente el escenario y el caso estudiado, así como un conjunto de indicadores de interés desarrollados para evaluar el rendimiento de los modelos propuestos en cada uno de ellos. A continuación, se muestra el formato concreto en el que se presentan estos resúmenes:

SEMILLA: X		INDICADORES DE INTERÉS				
CASO: X		PLANIFICACIÓN	Pac. ideal. atendibles	Pac. real. atendibles	Pacientes atendidos	Pacientes sin atender
Grado de cobertura de los recursos: X		Etapa prequirúrgica	X	X	X	X
Nivel de demanda: X		Etapa quirúrgica	X	X	X	X
		Etapa postquirúrgica	X	X	X	X
Número de consultas: X		TOTAL	X	X	X	X
Número de quirófanos: X						
		LISTAS DE ESPERA INICIALES	Pacientes totales	Pacientes atendidos	Pacientes sin atender	
Número de tipos de intervenciones: X		Etapa prequirúrgica	X	X	X	
Número de cirujanos: X		Etapa quirúrgica	X	X	X	
Número de semanas del horizonte temporal: X		Etapa postquirúrgica	X	X	X	
		TOTAL	X	X	X	
Demanda total: X						
		ATRASO	Pac. atendidos con atraso	Atraso medio (sem)	Pac. sin atender con atraso	Atraso medio (sem)
		Etapa prequirúrgica	X	X	X	X
		Etapa quirúrgica	X	X	X	X
		Etapa postquirúrgica	X	X	X	X
Porcentaje de uso de las consultas: X		TOTAL	X	X	X	X
Porcentaje de uso de los quirófanos: X						
Proporción del tiempo dedicado a consultas por los cirujanos: X		Número de variables: X				
Proporción del tiempo dedicado a quirófano por los cirujanos: X		Número de restricciones: X				
Tiempo medio de la etapa prequirúrgica (min): X		Grado de satisfacción de los cirujanos: X				
Tiempo medio de la etapa quirúrgica (min): X		Estatus de la función objetivo: X				
Tiempo medio de la etapa postquirúrgica (min): X		GAP: X				
Tiempo de ejecución (min): X		Valor de la función objetivo: X				

Tabla 18 - Ejemplo de una solución genérica alcanzada

Algunos de los indicadores de interés que aparecen en estos resúmenes precisan una pequeña explicación:

- Pacientes idealmente atendibles: aquellos que podrían ser atendidos si no los recursos fueran ilimitados.
- Pacientes realmente atendibles: aquellos que, por su semana de llegada a la etapa en cuestión, pueden ser potencialmente atendibles dentro del horizonte temporal.

- Porcentaje de uso de consultas y quirófanos: tiempo total usado de estos recursos entre su disponibilidad total a lo largo del horizonte temporal de planificación.
- Proporción del tiempo dedicado a consultas y quirófanos por los cirujanos: tiempo total empleado por el personal médico para atender pacientes en consulta y quirófano con respecto al tiempo total de los turnos que tienen asignados a estos recursos.
- Tiempo de ejecución: número de minutos que se han empleado para lograr la solución alcanzada.
- Estatus de la función objetivo: OPTIMAL, si se alcanza la solución óptima; FEASIBLE, si la solución obtenida es factible pero no la mejor del problema.
- GAP: este indicador, “considera la brecha entre la mejor solución encontrada (objective_value) b y el mejor objetivo destino l (objective_bound) y se calcula como $g = \frac{|b - l|}{|b|}$. Si no se ha encontrado ninguna solución o si $b = 0$ entonces $g = \infty$. Si la solución óptima ha sido alcanzada entonces $g = 0$ ” (Python-MIP documentation, s. f.).

La elección de los parámetros e indicadores que aparecen en estos resúmenes se ha basado en la capacidad que presentan para proporcionar información significativa sobre el comportamiento de los modelos. Cada uno de ellos desempeña un papel crucial en la evaluación del rendimiento de los modelos propuestos, permitiendo medir aspectos clave como la eficiencia en el uso de recursos, la satisfacción de los cirujanos o los atrasos en la atención proporcionada.

Además, estos resúmenes serán usados para extraer los resultados de cada una de las soluciones obtenidas durante la experimentación y facilitarán el análisis que se realizará próximamente acerca de los resultados obtenidos en los diferentes escenarios y casos planteados.

Igualmente, el código desarrolla, para cada solución alcanzada, un cuadrante que materializa la planificación anual obtenida. Para una semana genérica, este se presenta del siguiente modo:

CIRUJANOS:		1	2	3	4	5	6	7	8
SEMANA DE PLANIFICACIÓN:23	E1								
	I: 0	FORM	-	-	-	VACAS - 9	7	MATRI	-
	I: 1	FORM	-	-	2	VACAS - 9	-	MATRI	-
	I: 2	FORM	-	-	-	VACAS - 9	-	MATRI	9
	E2 (PRIN)								
	I: 0	FORM	2	-	-	VACAS - 9	-	MATRI	-
	I: 1	FORM	-	6	-	VACAS - 9	-	MATRI	-
	I: 2	FORM	-	-	-	VACAS - 9	-	MATRI	-
	E2 (AUX)								
	I: 0	FORM	-	-	-	VACAS - 9	-	MATRI	-
	I: 1	FORM	6	-	-	VACAS - 9	-	MATRI	-
	I: 2	FORM	-	-	-	VACAS - 9	-	MATRI	-
	E3								
	I: 0	FORM	3	-	4	VACAS - 9	-	MATRI	-
	I: 1	FORM	4	-	-	VACAS - 9	-	MATRI	-
I: 2	FORM	-	-	-	VACAS - 9	-	MATRI	-	

Tabla 19 - Ejemplo de planificación alcanzada para una semana genérica

Aparecen por columnas los diferentes cirujanos del problema concreto, por filas los diferentes tipos de intervención, y por bloques las diferentes etapas del proceso AH-MQ, de modo que:

- Si el cirujano se encuentra realizando actividad asistencial, muestra para cada etapa, el número de pacientes de cada tipo de intervención planificados con ese cirujano para esa semana en concreto (“-” si esta cifra es cero).
- Si el cirujano no se encuentra realizando actividad asistencial, entonces indica el motivo de su ausencia: formación (FORM), permiso por matrimonio (MATRI) o vacaciones (VACAS), seguido este último por la prioridad que el cirujano otorgó a esa semana.

7.4 Análisis de los resultados obtenidos

Considerando los diferentes escenarios y casos planteados, se han llevado a cabo dos grandes estudios:

- Análisis entre modelos básico e integral. En primer lugar, se han contrastado todas las soluciones alcanzadas mediante ambos modelos desarrollados para observar y evaluar los efectos de la inclusión de la gestión de recursos humanos al considerar vacaciones, formaciones y permisos en la planificación de la atención médica.
- Análisis entre soluciones del modelo integral. En segundo lugar, se han analizado con mayor profundidad todas las casuísticas presentes en las soluciones alcanzadas con el modelo en cuestión. Se han comparado los casos en los que la demanda se mantiene constante mientras varía el exceso mínimo de disponibilidad de cirujanos y se ha estudiado también el caso contrario, en el que α se mantiene constante mientras β cambia para los dos escenarios considerados: 2 consultas y 1 quirófano (escenario 1) y 3 consultas y 2 quirófanos (escenario 2).

7.4.1 Análisis entre modelos básico e integral

La comparación de las soluciones obtenidas mediante ambos modelos muestra resultados sorprendentes.

- Análisis de la inclusión de vacaciones, formaciones y permisos en la planificación:

No existe una diferencia significativa en la atención a los pacientes según ambos modelos. Los resultados revelan que, en general, apartar la gestión de vacaciones, formaciones y permisos y omitir los aspectos relacionados con los recursos humanos, si bien distorsiona la realidad y ofrece una planificación diferente respecto a la alcanzada considerando estos factores no, implica un gran cambio en la atención de los pacientes y en la planificación de la actividad asistencial.

Si el número de cirujanos con el que cuenta la unidad quirúrgica en cuestión es suficientemente elevado para hacer frente a la disminución de los turnos de consulta y quirófano que originan las consideraciones del modelo integral de planificación y gestión del personal, no se experimentarán grandes cambios en la planificación al incluir estos aspectos de recursos humanos. La disponibilidad de consultas y quirófanos será la principal restricción:

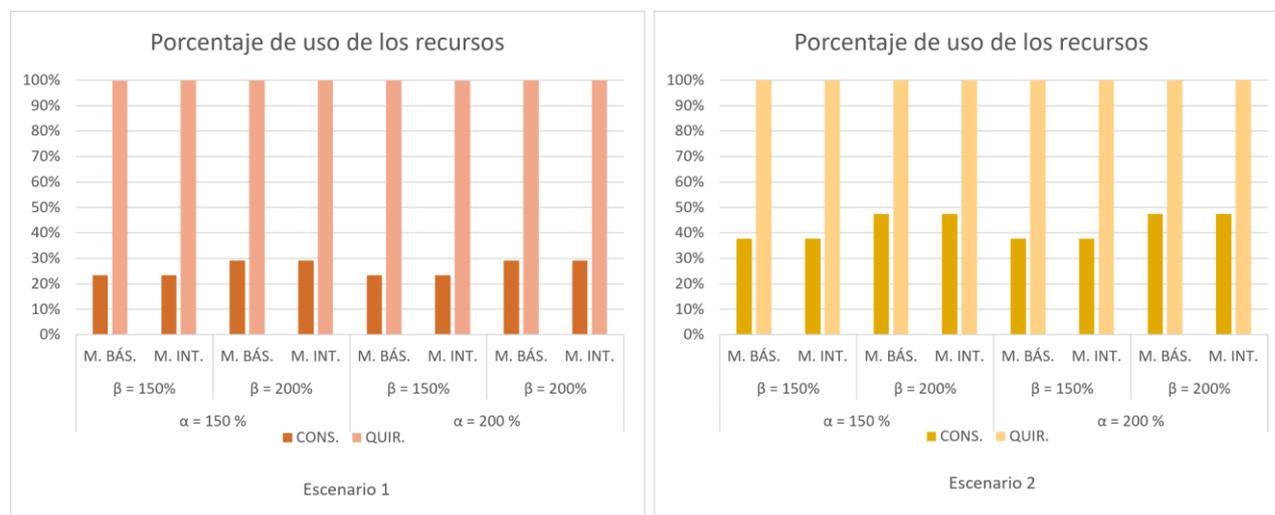


Ilustración 1 - Comparación del porcentaje de uso de los recursos según el modelo básico e integral

En estos casos, el elevado nivel de demanda hace que la disponibilidad de los quirófanos sature antes que la del resto de recursos. Las diferencias entre las soluciones alcanzadas por ambos modelos son escasas:

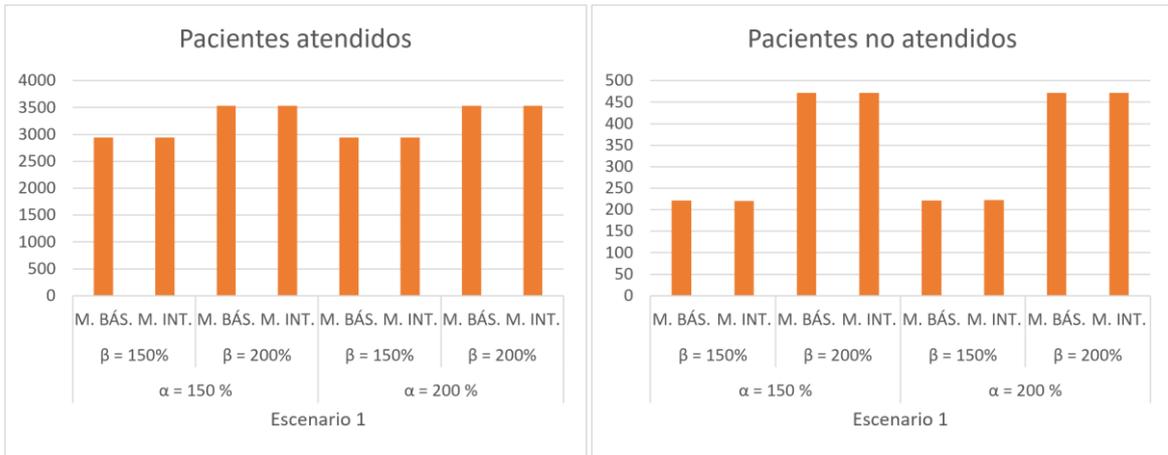


Ilustración 2 - Pacientes atendidos y no atendidos según ambos modelos para el escenario 1

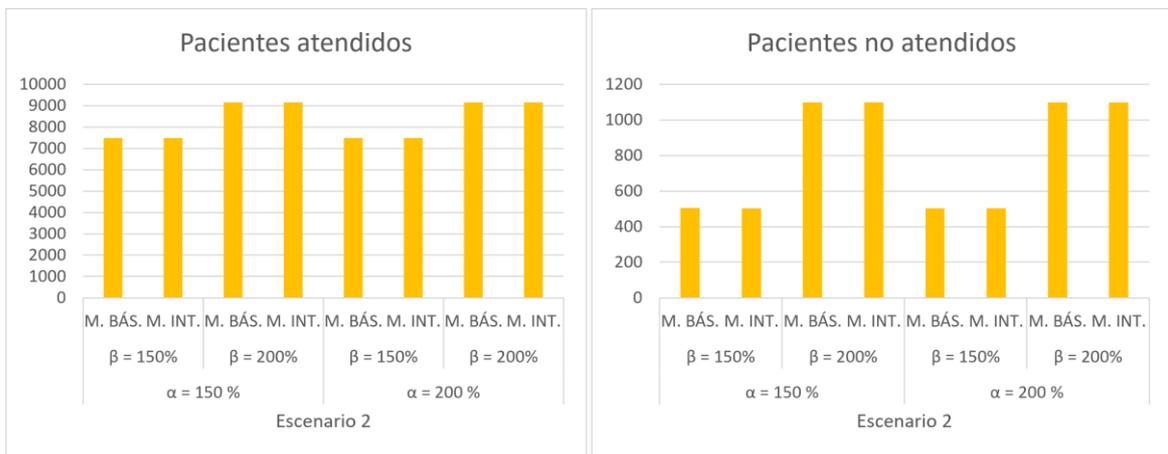


Ilustración 3 - Paciente atendidos y no atendidos según ambos modelos para el escenario 2

No obstante, añadir la gestión de vacaciones, permisos y formaciones modifica la planificación de los pacientes en sí mismo. A pesar de alcanzar el mismo número de pacientes atendidos y sin atender y conseguir prácticamente el mismo atraso, las planificaciones alcanzadas con ambos modelos son distintas, puesto que cambian las semanas en las que los pacientes son planificados debido, principalmente, a las ausencias de profesionales médicos por vacaciones, desplazando los volúmenes de intervenciones según la época del año:

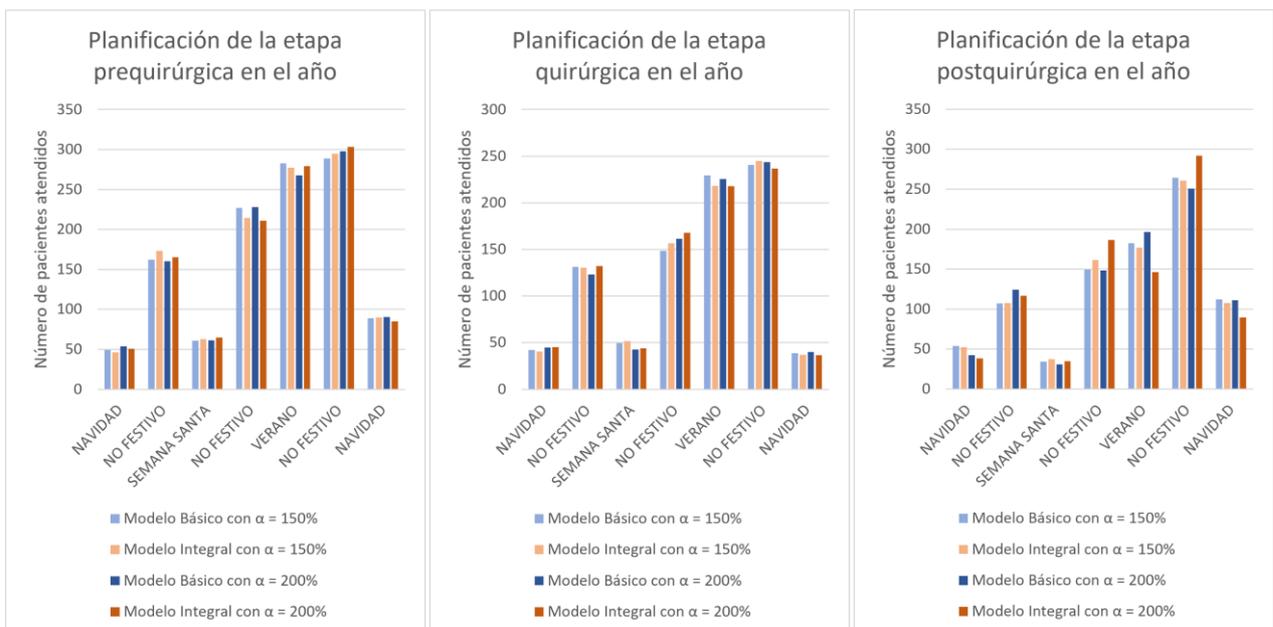


Ilustración 4 - Planificaciones alcanzadas para el escenario 1 con ambos modelos para $\beta = 150\%$

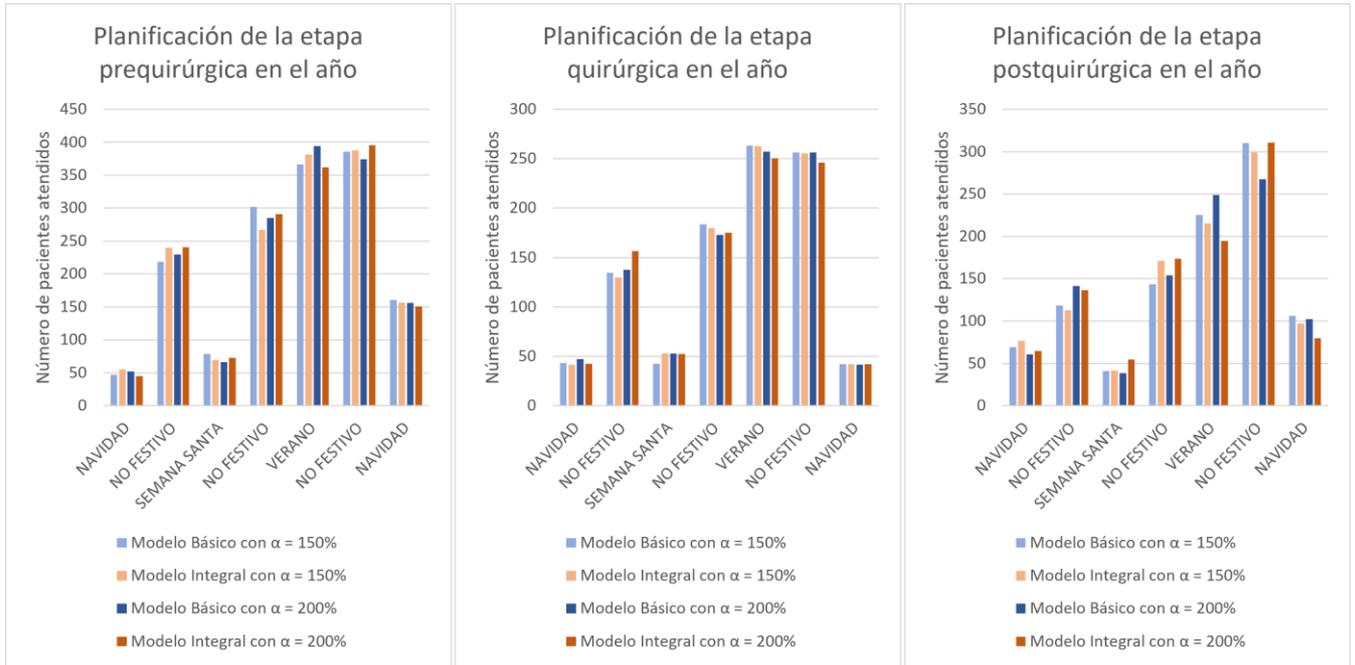


Ilustración 5 - Planificaciones alcanzadas para el escenario 1 con ambos modelos para $\beta = 200\%$

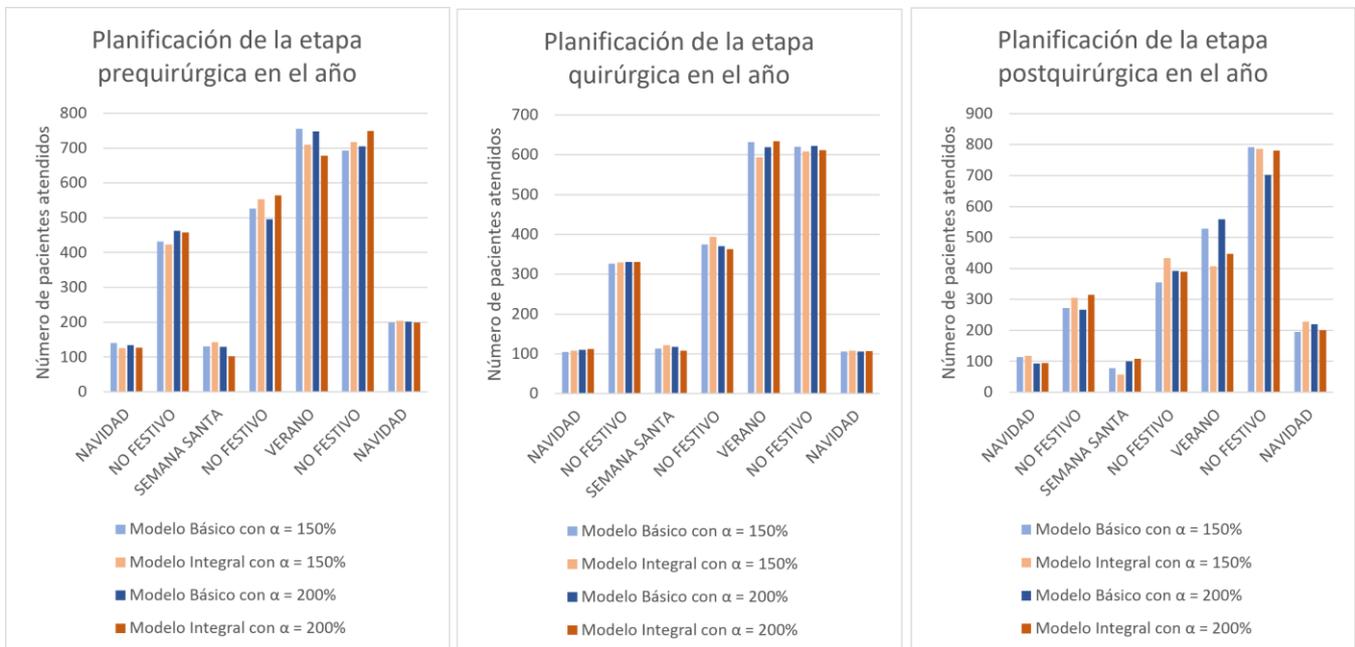


Ilustración 6- Planificaciones alcanzadas para el escenario 2 con ambos modelos para $\beta = 150\%$

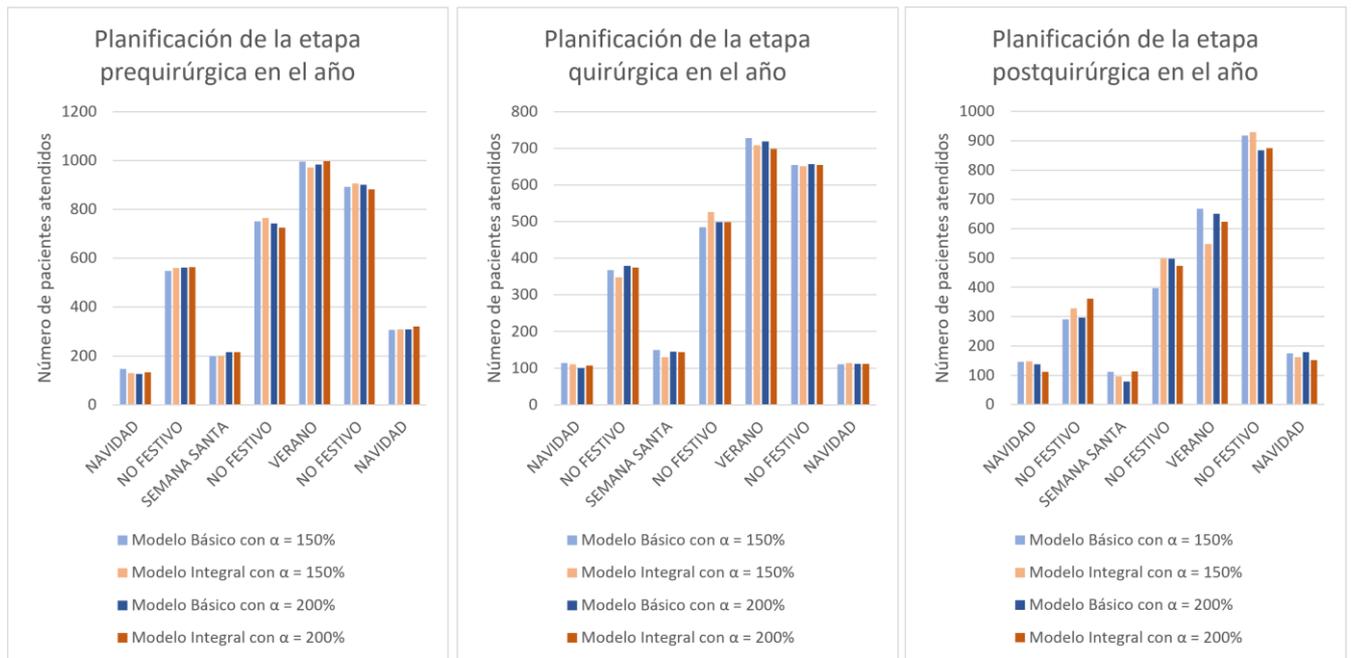


Ilustración 7 - Planificaciones alcanzadas para el escenario 2 con ambos modelos para $\beta = 200\%$

En general, se observa como la planificación de los pacientes alcanzada con el modelo básico para las diferentes épocas del año presenta ciertas diferencias con la elaborada por el modelo integral. Normalmente, aunque a nivel global el número de pacientes atendidos es el mismo con ambas planificaciones, durante las épocas que los cirujanos tienen mayor preferencia para las vacaciones, el número de pacientes atendidos disminuye, aumentando en las épocas en las que estas prioridades son inferiores. Así, principalmente durante las semanas de verano se contempla una disminución de los pacientes atendidos, neutralizada con un aumento de las intervenciones durante las épocas sin festividades. El exceso de disponibilidades de recursos humanos permite este fenómeno.

- Análisis computacional sobre el rendimiento del modelo:

Ambos modelos también presentan múltiples similitudes desde el punto de vista computacional. La relación entre soluciones óptimas alcanzadas y soluciones factibles mostrada por el modelo básico y el modelo integral son prácticamente idénticas. Limitar el tiempo máximo de computación de los problemas reduce considerablemente la relación entre soluciones óptimas y factibles en ambos modelos:

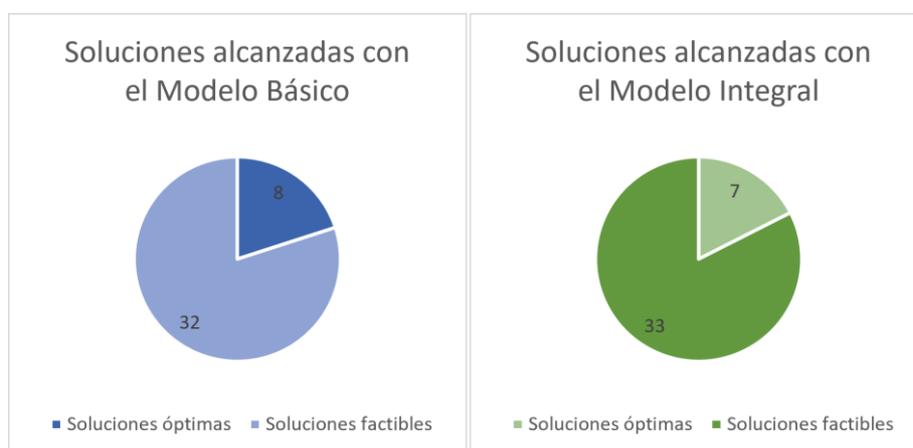


Ilustración 8 - Soluciones óptimas y factibles alcanzadas por ambos modelos

Por otra parte, el modelo integral incorpora nuevas variables y restricciones para modelar la gestión del personal, pero el incremento de ellas es minúsculo en comparación con el número total correspondiente. Sin embargo, incorporar la consideración de los aspectos de recursos humanos tiene clara implicaciones en el tiempo de computación:

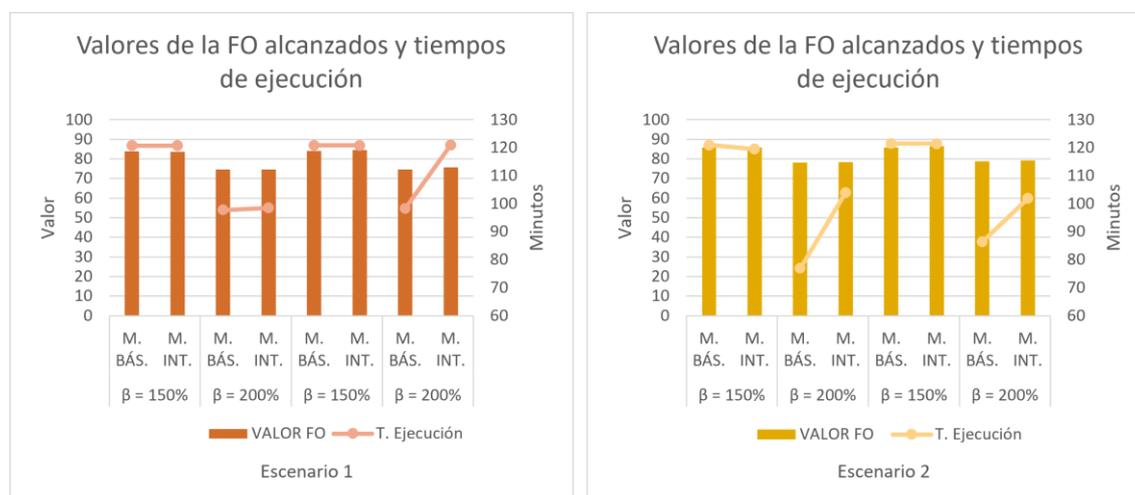


Ilustración 9 - Valores de las funciones objetivos y tiempos de ejecución para ambos modelos

Los valores objetivos alcanzados son igualmente muy parecidos; no obstante, el modelo básico obtiene ligeramente mejores valores del GAP que el modelo integral, debido a su carácter más simple (0.05% para el modelo básico frente al 0.07% del integral).

- Análisis global de ambos modelos:

Los resultados expuestos validan los modelos básico e integral y demuestran que las restricciones son correctas igualmente:

- Se alcanzan soluciones óptimas y soluciones factibles coherentes, en ningún caso, soluciones infactibles.
- No se sobrepasan los límites de disponibilidad de recursos físicos ni humanos.
- Se obtiene la máxima utilización de los quirófanos, cuellos de botella del sistema.
- Los pacientes en las listas de espera iniciales son atendidos en su totalidad:

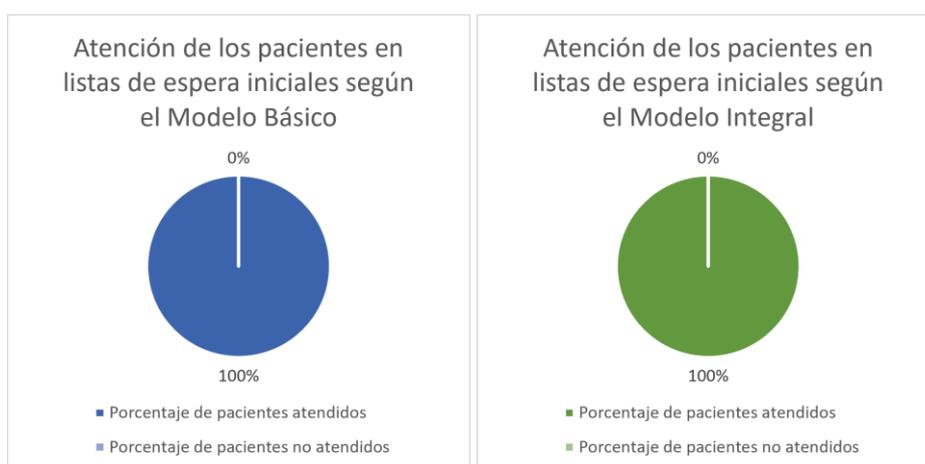


Ilustración 10 - Atención de las listas de espera según ambos modelos

En definitiva, los modelos modelan la realidad y arrojan conclusiones interesantes sobre los escenarios considerados, permitiendo ampliar su uso, además, como herramientas para medir la ocupación de los recursos físicos y humanos y para analizar la asignación de consultas, quirófanos y cirujanos a los diferentes servicios quirúrgicos.

Prueba de ello son las conclusiones alcanzadas respecto al tamaño de los servicios quirúrgicos considerados. En este sentido, se ha detectado un exceso notorio de disponibilidad de consultas, como era de esperar. Teniendo en cuenta el tamaño y la demanda de los servicios quirúrgicos considerados y vistos los resultados, se concluye que es posible disminuir la disponibilidad máxima de turnos de estas consultas, pudiendo ser compartidas con otros servicios ya que para la afluencia de pacientes que reciben no precisan de la máxima disponibilidad.

Por último, este análisis permite reforzar la necesidad de contar con cirujanos en exceso en un servicio quirúrgico. El personal médico no puede estar compuesto estrictamente por el mínimo número de cirujanos necesario para cubrir los recursos físicos, puesto que, además de no contar con profesionales para atender el resto de tareas, no sería posible alcanzar una planificación factible al incumplir la legalidad impuesta por el Estatuto de los Trabajadores (Boletín Oficial del Estado, 2019). Además, como se verá a continuación, este exceso de cirujanos influye directamente en el grado de satisfacción de los cirujanos.

7.4.2 Análisis entre soluciones del modelo integral

Considerando las conclusiones alcanzadas en el anterior estudio, se profundiza ahora sobre las soluciones obtenidas mediante el modelo integral, obteniendo de nuevo conclusiones interesantes.

- Análisis del aumento del exceso de disponibilidad de cirujanos para hacer frente a la demanda:

El grado de satisfacción de los cirujanos aumenta al incrementar el exceso de disponibilidad de los recursos humanos. Si bien el modelo asegura que el personal médico disfrute de las cinco semanas de vacaciones correspondiente, en cualquier caso, puede que las semanas de vacaciones otorgadas no sean las de mayor preferencia. La mayor disponibilidad de turnos que proporciona la incorporación de nuevos médicos al equipo, permite otorgar semanas de vacaciones con mayor prioridad a los cirujanos al aumentar la flexibilidad de los horarios y de la planificación. Con un personal médico más amplio, se pueden distribuir las cargas de trabajo de manera más equitativa, lo que facilita la planificación de las vacaciones. Esta mayor flexibilidad en la gestión de recursos humanos permite que los cirujanos disfruten de un mejor equilibrio entre su vida profesional y personal:

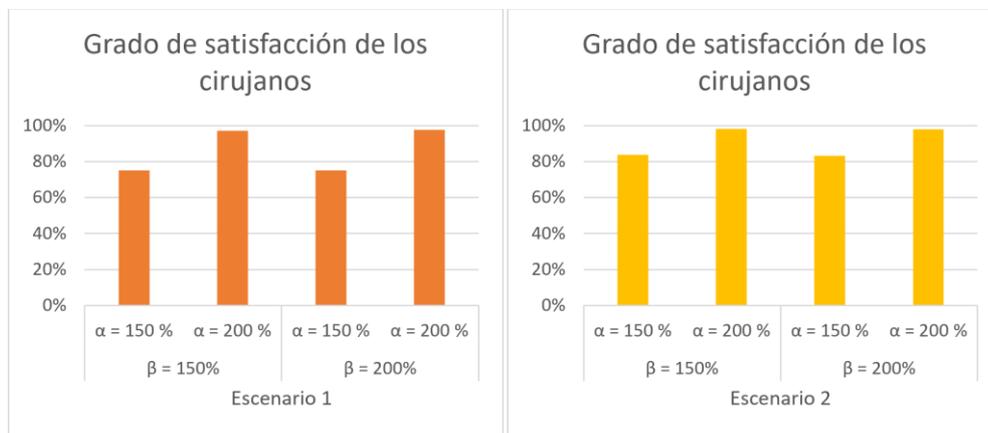


Ilustración 11 - Aumento del grado de satisfacción de los cirujanos

Además, se observa que no hay grandes cambios en el número de pacientes atendidos al aumentar α :

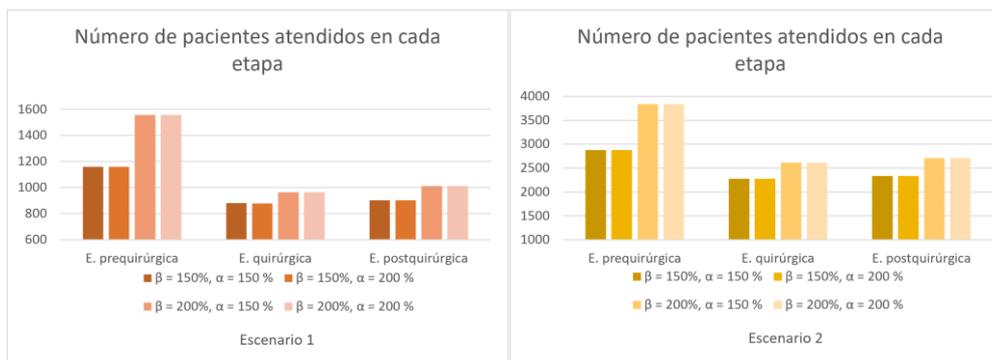


Ilustración 12 - Pacientes atendidos por etapas en función del exceso de disponibilidad de recursos humanos

Los quirófanos siguen siendo los cuellos de botella del sistema debido a las largas duraciones de las intervenciones que en ellos se realizan. En consecuencia, las disponibilidades de estos se agotan antes que las del resto de recursos. Además, el aumento del número de cirujanos resulta en una disminución de la proporción del tiempo que estos dedican a consultas y quirófanos:

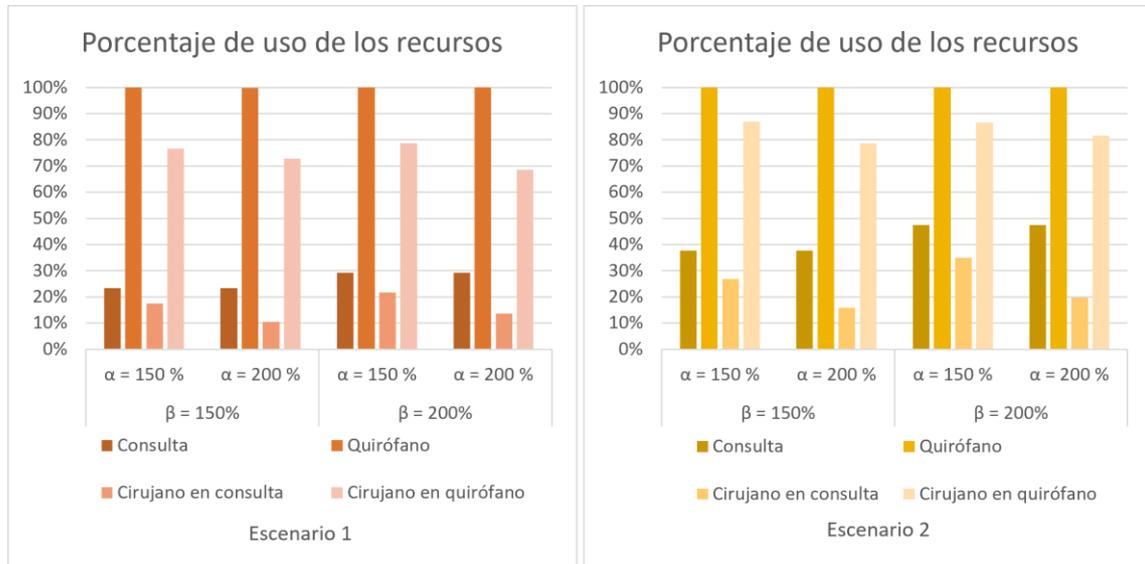


Ilustración 13 - Comparación del porcentaje de uso de los recursos

- Análisis del aumento del nivel de demanda con los recursos disponibles:

En especial, el atraso medio de la etapa quirúrgica se ve gravemente afectado por el aumento del número de pacientes que llegan al sistema a lo largo del horizonte temporal. Al contar con la misma disponibilidad de recursos físicos, los quirófanos agravan considerablemente el número de pacientes sin atender en la etapa quirúrgica y su atraso medio:

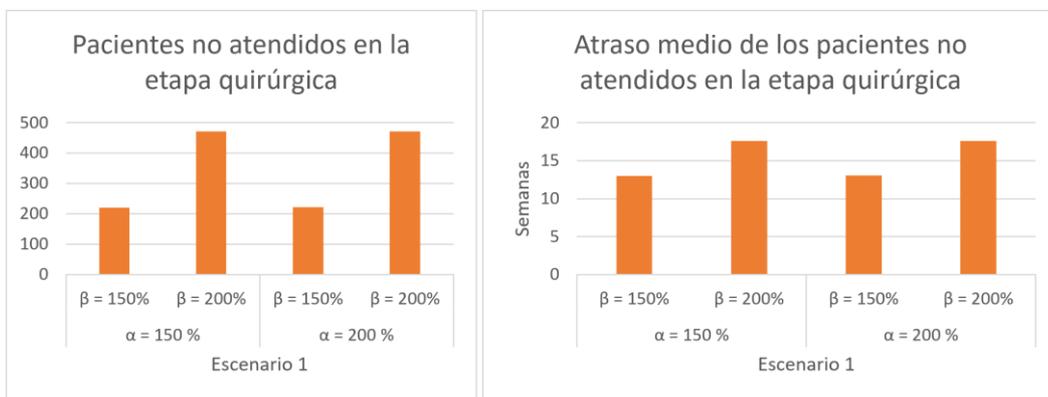


Ilustración 14 - Pacientes no atendidos en la etapa quirúrgica y su atraso medio para el escenario 1

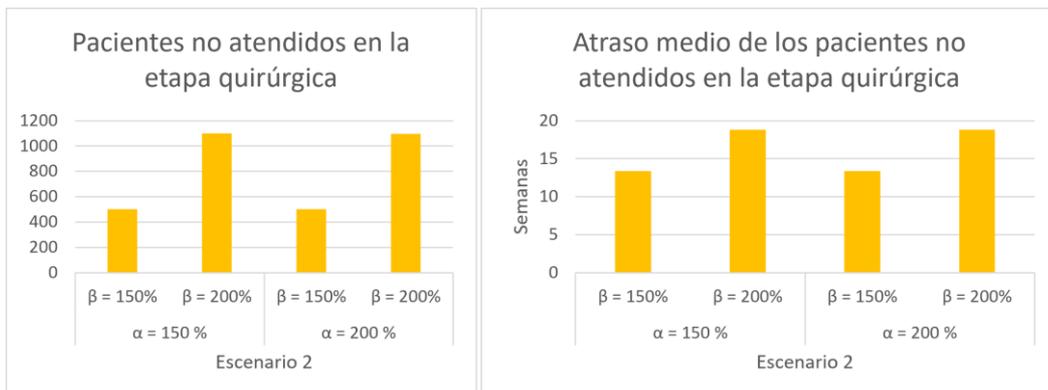


Ilustración 15 - Pacientes no atendidos en la etapa quirúrgica y su atraso medio para el escenario 2

Los quirófanos siguen imponiendo el límite de pacientes que pueden ser atendidos. De nuevo, su porcentaje de uso es el máximo:

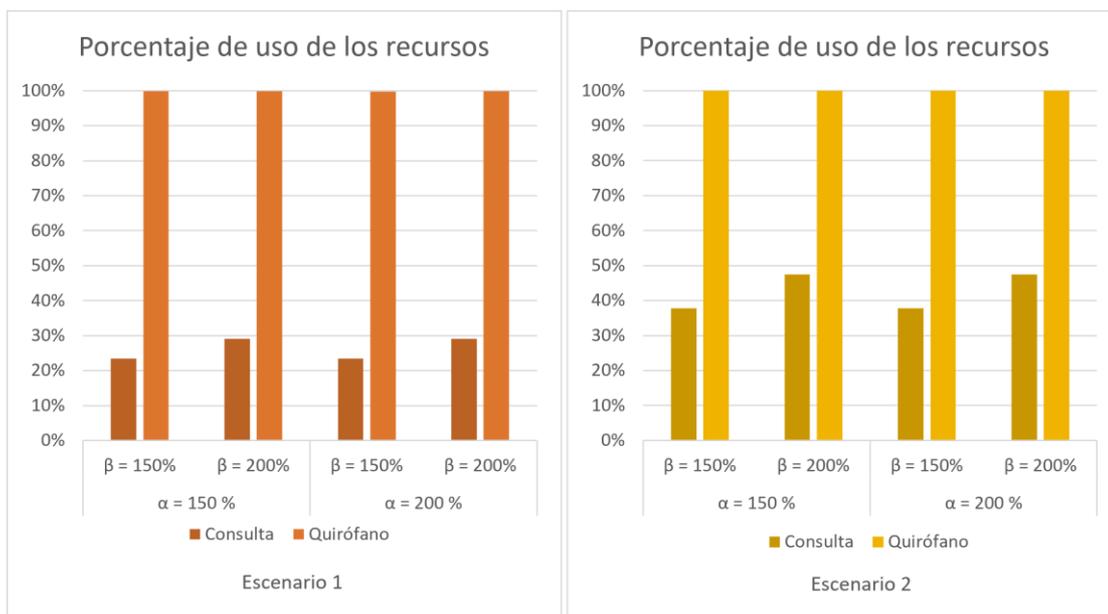


Ilustración 16 - Comparación del porcentaje de uso de los recursos físicos al aumentar el nivel de demanda

No obstante, se aprecia un ligero incremento del uso de las consultas. La llegada de un número mayor de pacientes al proceso de AH-MQ propicia un aumento del número total de pacientes atendidos en cada etapa. Al buscar una planificación que atienda al máximo número de pacientes posible, se priorizan los pacientes cuyos tiempos de intervención son menos. Así, reduciendo el tiempo medio de los pacientes en cada etapa, la planificación consigue aumentar el número de pacientes atendidos:

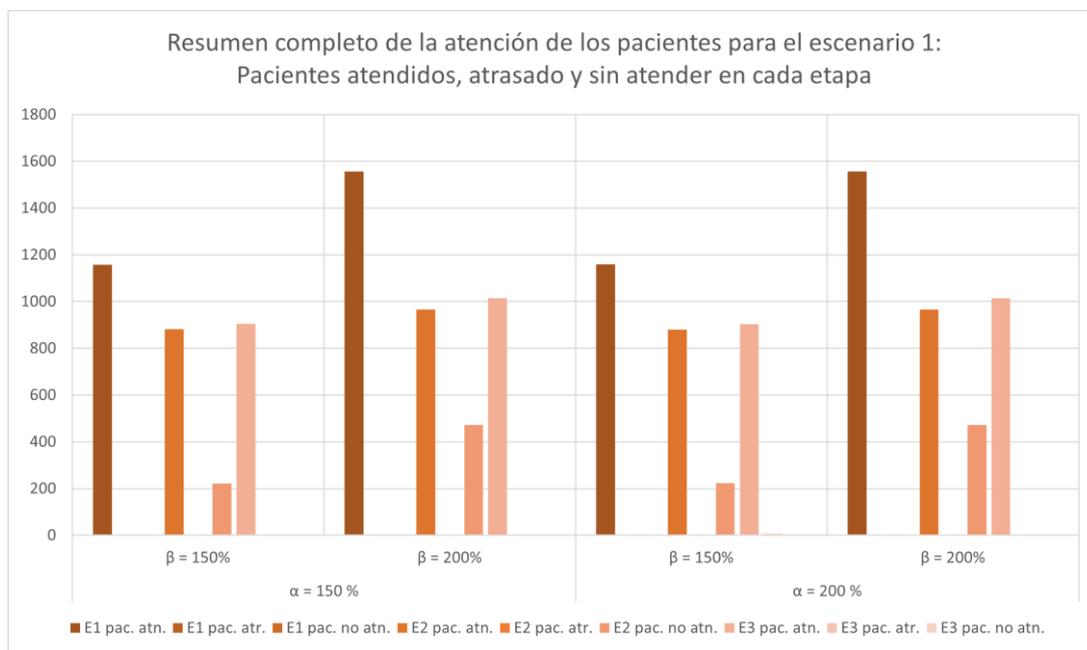


Ilustración 17 - Resumen de la atención para el escenario 1

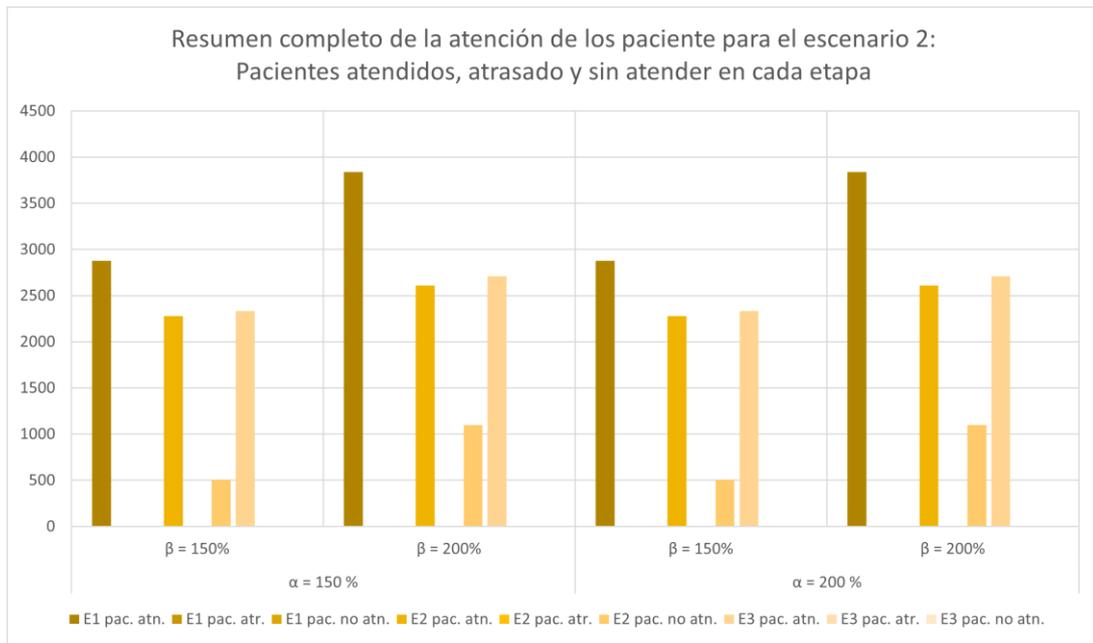


Ilustración 18 - Resumen de la atención para el escenario 2

El aumento del nivel de demanda no impacta sobre el grado de satisfacción de los cirujanos.

En definitiva, la consistencia y coherencia de los resultados obtenidos a través de los modelos desarrollados en este estudio refuerzan su validez y confiabilidad en el contexto de la planificación de la atención médica. Las conclusiones alcanzadas refuerzan la utilidad y la aplicabilidad de los modelos desarrollados, que ofrecen información valiosa para la toma de decisiones en la planificación hospitalaria.

8 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El presente Trabajo Fin de Grado ha abordado con profundidad la planificación de las diferentes etapas del proceso AH-MQ a través del desarrollo de modelos de programación lineal entera para la optimización de la atención de los pacientes. Sin embargo, existen múltiples frentes de investigación que pueden enriquecer aún más este estudio y abordar desafíos adicionales. A continuación, se presentan algunas de las futuras líneas de investigación que podrían ser exploradas:

- Inclusión de operaciones de urgencia:

Una de las extensiones naturales de este trabajo se encuentra en el modelado de las operaciones de urgencia. A menudo, los hospitales deben hacer frente a intervenciones inesperadas y críticas que deben programarse con rapidez y de manera eficiente para garantizar la atención oportuna de los pacientes. Futuras investigaciones podrían incorporar este escenario al modelo, considerando las prioridades, recursos y tiempos de respuesta requeridos para estas urgencias.

- Contemplación de turnos de guardia:

La programación de guardias médicas, en particular de cirujanos, es esencial para la planificación de los turnos de trabajo, teniendo en cuenta los salientes de las guardias. La investigación podría enfocarse en desarrollar modelos que optimicen la asignación de estas guardias, considerando tanto la carga de trabajo previa como las restricciones legales y laborales. La planificación de salientes y entrantes en las guardias también representa un desafío interesante.

- Integración de permisos y formaciones como nivel de decisión:

En el modelo integral de planificación asistencial y gestión del personal se han considerado los permisos y las formaciones como datos conocidos al inicio del horizonte temporal. Sin embargo, la incorporación de estas variables en el nivel de decisión, permitiendo que el modelo determine la programación óptima de estos permisos y formaciones, se presenta como una línea de investigación prometedora.

- Implementación de políticas de vacaciones de verano:

Muchas son las empresas que obligan a sus empleados a tomar dos semanas consecutivas de vacaciones en verano para desconectar de la rutina y la vida cotidiana. Se plantea la posibilidad de añadir al modelo nuevas restricciones para modelar aquellas políticas de vacaciones, por ejemplo, imponer que los trabajadores tengan dos semanas de vacaciones consecutivas durante los meses de verano. Esta política podría trasladarse a cualquier época o estación del año.

El campo de la planificación hospitalaria ofrece numerosas vías para la investigación y la innovación. Estas futuras líneas enriquecerían considerablemente los modelos desarrollados, contribuyendo a mejorar la eficiencia de la atención médica e impactando directamente en la calidad de vida de los pacientes y en la gestión de los recursos sanitarios. Cada una de estas áreas representa un desafío apasionante para completar la visión de los modelos desarrollados en este Trabajo Fin de Grado.

9 CONCLUSIONES

Este Trabajo Fin de Grado ha logrado con éxito alcanzar sus objetivos fundamentales: el desarrollo de dos modelos de programación lineal para la gestión del personal en el ámbito sanitario.

Se ha implementado y validado experimentalmente mediante el lenguaje de programación Python y la librería MIP, demostrando su eficacia y aplicabilidad práctica. Los casos y escenarios considerados han mostrado y reflejado la validez de los modelos propuestos:

- Se ha evaluado la inclusión de la gestión de las vacaciones, permisos matrimoniales y formaciones médicas en la planificación de la atención hospitalaria a través del análisis de los resultados obtenidos con ambos modelos, que ha resaltado las diferencias observadas en las planificaciones al tener en cuenta los aspectos de recursos humanos.
- Se han analizado diferentes niveles de exceso de disponibilidad de recursos humanos y se ha examinado el impacto que tiene sobre el grado de satisfacción de los cirujanos.
- Se ha estudiado el impacto que tiene sobre la atención hospitalaria un aumento del nivel de demanda, considerando los recursos disponibles, evidenciando el agravamiento de los atrasos en estos escenarios.
- Se ha logrado desarrollar una herramienta de planificación que facilita la asignación de pacientes y permite maximizar el uso de los recursos físicos.
- Se han abordado las diferentes líneas de investigación que podrían continuar ampliando el alcance de los modelos desarrollados.

En definitiva, todos los objetivos han sido alcanzados y los modelos desarrollados reflejan, aunque a pequeña escala, las complejas dinámicas que se encuentran en la planificación del personal médico.

BIBLIOGRAFÍA

- Albareda, J., Clavel, D., Mahulea, C., Blanco, N., Ezquerro, L., Gómez, J., & Silva, J. (2017). ¿Realizamos bien la programación quirúrgica? ¿Cómo podemos mejorarla? *Revista Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología*, p. 375-382, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.recot.2017.07.006>
- Alvarado Boirivant, J. (2008). La programación lineal aplicación de las pequeñas y medianas empresas. *Reflexiones*, 88(1), 90-105. <https://www.redalyc.org/pdf/729/72912559007.pdf>
- Boletín Oficial del Estado. (2019). *Estatuto de los trabajadores: La normal al día*. BOLETIN OFICIAL DEL ESTADO BOE. https://www.boe.es/biblioteca_juridica/abrir_pdf.php?id=PUB-DT-2023-139
- Bovim, T. R., Abdullahu, A., Andersson, H., & Gullhav, A. N. (2022). Integrated Master Surgery and outpatient clinic scheduling. *Operations research for health care*, 35, 100358. <https://doi.org/10.1016/j.orhc.2022.100358>
- Cañete Yaque, C. (2022). Métodos iterativos voraces para resolver la planificación integrada de consultas y quirófanos. (Trabajo Fin de Grado Inédito). Universidad de Sevilla, Sevilla. https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/140234/TFG4001_Ca%cc3%bl1ete%20Yaque.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Castro Gusmão, R. (2008). *La continuidad asistencial entre niveles asistenciales en pacientes con Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (EPOC)* [Tesis de maestría]. Universitat Pompeu Fabra. <https://www.consorcio.org/media/upload/pdf/publicacions/castro-gusmao-r.-la-continuida.pdf>
- CBC user's guide. (s. f.). Introduction <https://coin-or.github.io/Cbc/intro.html#:~:text=The%20COIN%2DOR%20Branch%20and,executable%20version%20is%20also%20available.>
- Datosmacro.com. (s. f.). España - Matrimonios <https://datosmacro.expansion.com/demografia/matrimonios/espana>
- Erazo-Luzuriaga, A. F., Ramos-Secaira, F. M., Galarza-Sánchez, P. C., & Boné-Andrade, M. F. (2023). La inteligencia artificial aplicada a la optimización de programas informáticos. *Journal of Economic and Social Science Research*, 3(1), 48-63. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v3/n1/61>
- Fernández Pereiro, M. (2020). Actuación del TCAE en la unidad de hospitalización en pre - intra y postoperatorio. *Revista Ocronos*. <https://revistamedica.com/actuacion-tcae-unidad-hospitalizacion-pre-intra-postoperatorio/#:~:text=desarrollado%20varias%20etapas.-,ETAPAS%20DEL%20PROCESO%20QUIR%20C3%9ARGICO,en%20la%20sala%20de%20reanimaci%20C3%B3n>
- Fundación Estatal para la formación en el empleo. (2021). Formación en las empresas 2021. <https://www.fundae.es/docs/default-source/publicaciones-y-evaluaciones/publicaciones-estad%20C3%ADstica/formaci%20C3%B3n-en-las-empresas-2021.pdf>

- Gallegos, R. de la F., & Santelices Malfanti, I. (2010). Diseño de un modelo de planeación agregada para las prestaciones médicas en un servicio de ginecología y obstetricia. *Ingeniería industrial*, 9(2), 27-46. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3719523>
- López Garcelán, J. (2023). Desarrollo de modelos de programación lineal para la gestión del flujo de pacientes en un servicio de urgencias hospitalario. (Trabajo Fin de Grado Inédito). Universidad de Sevilla, Sevilla. https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/148238/documento_trabajo_G4547.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Médicos y Pacientes. (2022). Precariedad laboral, más precariedad sanitaria y dignidad con los pacientes. En la situación actual no es posible hablar de equidad y justicia en el sistema nacional de salud. *Médicos y Pacientes*. <https://www.medicosypacientes.com/opinion/precariedad-laboral-mas-precariedad-sanitaria-y-dignidad-con-los-pacientes-en-la-situacion>
- Morillo, D., Moreno, L., & Díaz, J. (2013). Metodologías analíticas y heurísticas para la solución del problema de programación de Tareas con Recursos Restringidos (RCPSP): Una revisión. Parte 1. *SciELO*, 10(19). http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-91652014000100013
- Nieto Medina, Á. (2021). Integración de planificación de intervenciones en quirófanos y camas postoperatorias. (Trabajo Fin de Grado Inédito). Universidad de Sevilla, Sevilla. <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/126044/TFG-3512-NIETO%20MEDINA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- OCDE. (2021). *Panorama de la Salud: Indicadores de la OCDE*. <https://www.oecd.org/health/Panorama-de-la-Salud-2021-OCDE.pdf>
- Pedroto, J. (2023). Optimizar el flujo de pacientes para mejorar la eficiencia y la experiencia del paciente. *Kaizen Institute Consulting Group*. <https://kaizen.com/es/insights-es/eficiencia-flujo-pacientes/>
- Pérez-Ciordia, I., Guillén-Grima, F. F., Brugos, A., & Aguinaga Ontoso, I. (2013). Satisfacción laboral y factores de mejora en profesionales de atención primaria. *Anales del Sistema Sanitario de Navarra*, 36(2), 253-262. <https://dx.doi.org/10.4321/S1137-66272013000200008>.
- Python-MIP documentation (s. f.). Introduction. <https://pythonmip.readthedocs.io/en/latest/intro.html>
- Python-MIP documentation. (s. f.). Classes. <https://python-mip.readthedocs.io/en/latest/classes.html>
- Riojas Cañari, A. C. (2005). *Conceptos, algoritmo y aplicación al problema de las N – reinas. Capítulo 2. Heurística y metaheurística* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/monografias/basic/riojas_ca/cap2.pdf
- Ríos-Insua, S., Mateos, A., & Jiménez, A. (2004). Optimización Multiobjetivo basada en Metaheurísticas. *Anales de la Real Academia de Doctores de España*, 8, 159-177. https://oa.upm.es/53451/1/INVE_MEM_2004_91573.pdf

Santaella Regadera, A. (2022). Planificación de quirófanos con consultas integradas: modelos de programación lineal entera para la resolución de un caso real. (Trabajo Fin de Grado Inédito). Universidad de Sevilla, Sevilla.

https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/140402/TFG4015_Santaella%20Regadera.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Suñé, A., Fonollosa, J. B., & Sallán, J. M. (2016). *Programación lineal. Métodos cuantitativos para la toma de decisiones* (Vol. 1).

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/89074/9788498806007.pdf>

Universitat Politècnica de València (2015). ¿Qué son las metaheurísticas?

<https://optimizacionheuristica.blogs.upv.es/2015/02/22/que-son-las-metaheuristicas/>

Anexo A. Resultados obtenidos y análisis de datos

		ETAPA PREQUIRÚRGICA					ETAPA QUIRÚRGICA					ETAPA POSTQUIRÚRGICA					
		P. A.	P. ATR.	ATR. M.	P. NO A.	ATR. M.	P. A.	P. ATR.	ATR. M.	P. NO A.	ATR. M.	P. A.	P. ATR.	ATR. M.	P. NO A.	ATR. M.	
		B	I	T	B	I	T	B	I	T	B	I	T	B	I	T	
Escenario 1: 2 consultas/1 quirófano	Semilla 30	Caso 0	1489	0	0	0	0	1249	0	0	195	10,69	1278	0	0	0	0
		B	1489	0	0	0	0	1249	0	0	195	10,69	1278	0	0	0	0
		I	1489	0	0	0	0	1249	0	0	195	10,69	1278	0	0	0	0
	Caso 1	2008	0	0	0	0	1517	0	0	435	17,49	1561	0	0	0	0	
	B	2008	0	0	0	0	1517	0	0	435	17,49	1561	0	0	0	0	
	I	2008	1	1	0	0	1517	0	0	435	17,48	1561	0	0	0	0	
	Caso 2	1489	0	0	0	0	1249	0	0	195	10,69	1278	0	0	0	0	
	B	1489	0	0	0	0	1249	0	0	195	10,69	1278	0	0	0	0	
	I	1489	0	0	0	0	1249	0	0	195	10,69	1278	0	0	0	0	
	Caso 3	2008	0	0	0	0	1517	0	0	435	17,48	1561	0	0	0	0	
	B	2008	0	0	0	0	1517	0	0	435	17,48	1561	0	0	0	0	
	I	2008	0	0	0	0	1517	0	0	435	17,48	1561	0	0	0	0	
	Semilla 80	Caso 0	1285	4	1	0	0	954	0	0	271	16,89	988	0	0	0	0
		B	1285	4	1	0	0	954	0	0	270	16,87	988	0	0	0	0
		I	1285	5	1	0	0	954	0	0	270	16,87	988	0	0	0	0
Caso 1		1726	0	0	0	0	994	0	0	524	19,85	1068	0	0	0	0	
B		1726	0	0	0	0	994	0	0	524	19,85	1068	0	0	0	0	
I		1726	0	0	0	0	994	0	0	524	19,85	1068	0	0	0	0	
Caso 2		1285	4	1	0	0	954	0	0	271	16,84	988	0	0	0	0	
B		1285	4	1	0	0	954	0	0	271	16,84	988	0	0	0	0	
I		1285	4	1	0	0	954	0	0	272	16,78	988	0	0	0	0	
Caso 3	1726	0	0	0	0	994	0	0	524	19,85	1068	0	0	0	0		
B	1726	0	0	0	0	994	0	0	524	19,85	1068	0	0	0	0		
I	1726	0	0	0	0	994	0	0	524	19,85	1068	0	0	0	0		
Semilla 210	Caso 0	799	6	1,67	0	0	559	13	2,77	170	10,59	578	20	7,1	0	0	
	B	799	6	1,67	0	0	559	13	2,77	170	10,59	578	20	7,1	0	0	
	I	799	1	1	0	0	563	1	2	166	10,05	583	0	0	0	0	
	Caso 1	1076	0	0	0	0	586	0	0	404	16,31	624	0	0	0	0	
	B	1076	0	0	0	0	586	0	0	404	16,31	624	0	0	0	0	
	I	1076	0	0	0	0	587	0	0	403	16,26	625	0	0	0	0	
	Caso 2	799	1	1	0	0	563	0	0	166	10,14	583	0	0	0	0	
	B	799	1	1	0	0	563	0	0	166	10,14	583	0	0	0	0	
	I	799	3	1,33	0	0	558	5	2,6	171	10,43	578	33	10,73	0	0	
Caso 3	1076	2	1,5	0	0	586	2	2,5	405	16,47	624	5	3,2	0	0		
B	1076	2	1,5	0	0	586	2	2,5	405	16,47	624	5	3,2	0	0		
I	1076	0	0	0	0	587	0	0	403	16,21	625	0	0	0	0		
Semilla 250	Caso 0	905	0	0	0	0	659	0	0	177	9,34	670	0	0	0	0	
	B	905	0	0	0	0	659	0	0	177	9,34	670	0	0	0	0	
	I	904	0	0	1	2,7	659	0	0	176	9,36	670	0	0	0	0	
	Caso 1	1219	0	0	0	0	718	0	0	423	14,75	744	0	0	0	0	
	B	1219	0	0	0	0	718	0	0	423	14,75	744	0	0	0	0	
	I	1219	0	0	0	0	718	0	0	424	14,73	744	0	0	0	0	
	Caso 2	905	0	0	0	0	659	0	0	177	9,38	670	0	0	0	0	
	B	905	0	0	0	0	659	0	0	177	9,38	670	0	0	0	0	
	I	905	0	0	0	0	659	0	0	177	9,36	670	0	0	0	0	
Caso 3	1219	0	0	0	0	718	0	0	423	14,76	744	0	0	0	0		
B	1219	0	0	0	0	718	0	0	423	14,76	744	0	0	0	0		
I	1219	0	0	0	0	718	0	0	423	14,78	744	0	0	0	0		
Semilla 350	Caso 0	1314	0	0	0	0	981	0	0	296	18,12	1003	0	0	0	0	
	B	1314	0	0	0	0	981	0	0	296	18,12	1003	0	0	0	0	
	I	1314	0	0	0	0	981	0	0	296	18,12	1003	0	0	0	0	
	Caso 1	1758	0	0	0	0	1013	0	0	571	19,68	1070	0	0	0	0	
	B	1758	0	0	0	0	1013	0	0	571	19,68	1070	0	0	0	0	
	I	1758	0	0	0	0	1013	0	0	571	19,68	1070	0	0	0	0	
	Caso 2	1314	0	0	0	0	981	0	0	297	18,19	1003	0	0	0	0	
	B	1314	0	0	0	0	981	0	0	297	18,08	1003	0	0	0	0	
	I	1314	0	0	0	0	981	0	0	297	18,08	1003	0	0	0	0	
Caso 3	1758	0	0	0	0	1013	0	0	571	19,68	1070	0	0	0	0		
B	1758	0	0	0	0	1013	0	0	571	19,68	1070	0	0	0	0		
I	1758	0	0	0	0	1013	0	0	571	19,68	1070	0	0	0	0		
Escenario 2: 3 consultas/2 quirófanos	Semilla 30	Caso 0	2587	0	0	1	1	2087	14	1,29	398	12,08	2156	32	10,53	0	0
		B	2587	0	0	1	1	2087	14	1,29	398	12,08	2156	32	10,53	0	0
		I	2587	0	0	1	29	2093	0	0	391	12,51	2160	3	2,33	0	0
		Caso 1	3452	0	0	0	0	2457	0	0	867	20,1	2545	0	0	0	0
		B	3452	0	0	0	0	2457	0	0	867	20,1	2545	0	0	0	0
		I	3452	0	0	0	0	2456	0	0	869	20,06	2545	0	0	0	0
		Caso 2	2588	0	0	0	0	2094	0	0	393	12,52	2162	0	0	0	0
		B	2588	0	0	0	0	2094	0	0	393	12,52	2162	0	0	0	0
		I	2588	0	0	0	0	2094	0	0	394	12,51	2161	0	0	0	0
	Caso 3	3452	0	0	0	0	2457	0	0	867	20,1	2545	0	0	0	0	
	B	3452	0	0	0	0	2457	0	0	867	20,1	2545	0	0	0	0	
	I	3452	0	0	0	0	2457	0	0	871	20,01	2544	0	0	1	1	
	Semilla 80	Caso 0	2591	1	2	1	39	1930	0	0	577	18,13	1969	0	0	0	0
		B	2592	0	0	0	0	1930	0	0	578	18,07	1969	0	0	0	0
		I	2592	0	0	0	0	1930	0	0	577	18,06	1969	0	0	0	0
		Caso 1	3455	12	1,42	1	5	2004	0	0	1246	18,62	2094	3	1	5	1
		B	3455	12	1,42	1	5	2004	0	0	1246	18,62	2094	3	1	5	1
		I	3455	2	3,5	1	5	2010	0	0	1241	18,87	2104	9	4,56	1	1
		Caso 2	2592	0	0	0	0	1930	0	0	576	18,12	1969	0	0	0	0
		B	2592	0	0	0	0	1930	0	0	577	18,06	1969	0	0	0	0
		I	2592	2	2	0	0	1930	0	0	577	18,06	1969	0	0	0	0
	Caso 3	3455	5	1,8	1	2	2004	0	0	1240	17,65	2094	3	1	5	1	
	B	3455	5	1,8	1	2	2004	0	0	1240	17,65	2094	3	1	5	1	
	I	3455	6	1,67	1	2	2012	0	0	1244	18,89	2105	9	4,33	2	1	
	Semilla 210	Caso 0	1800	0	0	0	0	1310	0	0	387	8,77	1352	0	0	0	0
		B	1800	0	0	0	0	1310	0	0	387	8,76	1352	0	0	0	0
		I	1800	0	0	0	0	1310	0	0	387	8,76	1352	0	0	0	0
Caso 1		2409	0	0	0	0	1412	0	0	862	14,4	1493	0	0			

		LISTAS DE ESPERA INICIALES										GSC	STATUS FO	GAP	VALOR FO	T (min)	DEM. TOT.		
		E. PRE.		E. QUI.		E. POST		PORCENTAJES DE USO											
		P. A.	P. NO A.	P. A.	P. NO A.	P. A.	P. NO A.	CONS.	QUIR.	C. EN C.	C. EN Q.								
Escenario 1: 2 consultas/1 quirófano	Semilla 30	Caso 0	B	36	0	27	0	119	0	29,38%	99,95%	53,67%	82,50%	-	FEASIBLE	0,000128	89,49	120,40	1453
			I	36	0	27	0	119	0	29,38%	99,95%	20,68%	81,18%	75,33%	FEASIBLE	0,000122	88,77	120,47	1453
		Caso 1	B	50	0	29	0	163	0	37,54%	99,85%	57,39%	69,59%	-	FEASIBLE	0,000259	83,99	120,37	1958
			I	50	0	29	0	163	0	37,54%	99,85%	26,49%	77,26%	75,33%	FEASIBLE	0,000248	83,54	120,53	1958
		Caso 2	B	36	0	27	0	119	0	29,38%	99,95%	45,47%	77,81%	-	FEASIBLE	0,000128	89,49	120,68	1453
			I	36	0	27	0	119	0	29,38%	99,95%	13,26%	70,44%	98,25%	FEASIBLE	0,000121	89,92	120,50	1453
	Caso 3	B	50	0	29	0	163	0	37,54%	99,85%	36,67%	68,28%	-	FEASIBLE	0,000259	83,99	120,33	1958	
		I	50	0	29	0	163	0	37,54%	99,85%	17,97%	65,87%	98,50%	FEASIBLE	0,000244	84,7	120,72	1958	
	Semilla 80	Caso 0	B	19	0	71	0	141	0	28,77%	100,00%	50,38%	70,77%	-	FEASIBLE	0,000308	83,63	121,31	1266
			I	19	0	71	0	141	0	28,78%	100,00%	21,90%	73,44%	75,67%	FEASIBLE	0,000277	83,22	121,07	1266
		Caso 1	B	26	0	94	0	190	0	36,04%	99,95%	58,45%	66,37%	-	FEASIBLE	0,000268	72,95	120,82	1700
			I	26	0	94	0	190	0	35,88%	99,95%	27,51%	75,82%	75,67%	FEASIBLE	0,000254	73,05	121,42	1700
		Caso 2	B	19	0	71	0	141	0	28,78%	100,00%	41,25%	71,17%	-	FEASIBLE	0,000297	83,63	121,34	1266
			I	19	0	71	0	141	0	28,78%	100,00%	13,07%	71,47%	97,25%	FEASIBLE	0,000436	84,29	121,52	1266
	Caso 3	B	26	0	94	0	190	0	35,95%	99,95%	33,69%	67,98%	-	FEASIBLE	0,000268	72,95	121,04	1700	
		I	26	0	94	0	190	0	35,97%	99,95%	16,04%	71,74%	97,75%	FEASIBLE	0,000251	74,16	121,47	1700	
	Semilla 210	Caso 0	B	16	0	47	0	63	0	14,92%	98,90%	23,34%	61,75%	-	FEASIBLE	0,000426	80,57	120,36	783
			I	16	0	47	0	63	0	14,98%	99,75%	13,22%	66,50%	75,67%	FEASIBLE	0,001123	80,72	120,37	783
Caso 1		B	21	0	62	0	84	0	18,32%	99,70%	37,24%	70,59%	-	FEASIBLE	0,001578	70,42	120,37	1055	
		I	21	0	62	0	84	0	18,31%	99,95%	14,90%	76,37%	75,67%	FEASIBLE	0,000618	70,72	120,43	1055	
Caso 2		B	16	0	47	0	63	0	14,98%	99,70%	20,89%	61,71%	-	FEASIBLE	0,001191	80,99	120,46	783	
		I	16	0	47	0	63	0	14,93%	98,80%	6,84%	68,51%	97,75%	FEASIBLE	0,011425	81,09	120,54	783	
Caso 3	B	21	0	62	0	84	0	18,31%	99,65%	26,33%	51,26%	-	FEASIBLE	0,001792	70,4	120,53	1055		
	I	21	0	62	0	84	0	18,33%	99,95%	8,83%	64,33%	99,50%	FEASIBLE	0,000585	71,91	121,08	1055		
Semilla 250	Caso 0	B	17	0	34	0	65	0	18,03%	100,00%	37,85%	73,91%	-	FEASIBLE	0,000447	82,52	120,37	888	
		I	17	0	34	0	65	0	18,02%	99,90%	12,94%	84,35%	73,67%	FEASIBLE	0,000875	82,03	120,84	888	
	Caso 1	B	23	0	45	0	88	0	22,30%	100,00%	23,26%	63,75%	-	FEASIBLE	0,000549	73,12	120,34	1196	
		I	23	0	45	0	88	0	22,31%	100,00%	17,69%	79,56%	73,67%	FEASIBLE	0,000526	73,13	120,50	1196	
	Caso 2	B	17	0	34	0	65	0	18,03%	100,00%	27,54%	63,99%	-	FEASIBLE	0,000455	82,52	120,38	888	
		I	17	0	34	0	65	0	18,03%	100,00%	8,12%	75,89%	97,25%	FEASIBLE	0,000423	83,24	120,37	888	
Caso 3	B	23	0	45	0	88	0	22,31%	100,00%	25,06%	71,43%	-	FEASIBLE	0,000552	73,12	120,41	1196		
	I	23	0	45	0	88	0	22,31%	100,00%	10,49%	69,96%	97,50%	FEASIBLE	0,000525	74,32	120,68	1196		
Semilla 350	Caso 0	B	24	0	50	0	102	0	25,94%	100,00%	45,17%	76,53%	-	FEASIBLE	0,000184	83,46	121,39	1290	
		I	24	0	50	0	102	0	25,94%	100,00%	18,68%	77,46%	75,25%	FEASIBLE	0,000175	83,03	121,10	1290	
	Caso 1	B	32	0	68	0	137	0	31,61%	100,00%	62,73%	85,62%	-	OPTIMAL	0	72,26	6,98	1726	
		I	32	0	68	0	137	0	31,64%	100,00%	22,10%	84,07%	75,25%	OPTIMAL	8,57E-06	72,39	9,67	1726	
	Caso 2	B	24	0	50	0	102	0	25,94%	99,95%	48,65%	65,36%	-	FEASIBLE	0,000213	83,46	121,35	1290	
		I	24	0	50	0	102	0	25,94%	100,00%	11,48%	77,46%	95,95%	FEASIBLE	0,00034	84,07	121,28	1290	
Caso 3	B	32	0	68	0	137	0	31,58%	100,00%	56,33%	71,51%	-	OPTIMAL	0	72,26	9,21	1726		
	I	32	0	68	0	137	0	31,52%	100,00%	14,33%	70,82%	95,95%	FEASIBLE	0,000345	73,42	121,15	1726		
Escenario 2: 3 consultas/2 quirófanos	Semilla 30	Caso 0	B	59	0	39	0	249	0	34,86%	100,00%	41,28%	72,65%	-	FEASIBLE	0,002719	87,5	121,06	2529
			I	59	0	39	0	249	0	34,88%	99,98%	27,29%	79,79%	84,00%	FEASIBLE	0,000713	87,48	121,89	2529
		Caso 1	B	74	0	56	0	317	0	43,63%	100,00%	59,03%	79,50%	-	OPTIMAL	0,000106	81,2	42,89	3378
			I	74	0	56	0	317	0	43,63%	99,98%	31,36%	84,10%	84,00%	FEASIBLE	0,000198	81,31	121,21	3378
		Caso 2	B	59	0	39	0	249	0	34,90%	99,98%	46,55%	77,89%	-	FEASIBLE	0,000144	87,72	121,42	2529
			I	59	0	39	0	249	0	34,90%	99,98%	15,18%	80,49%	98,29%	FEASIBLE	0,000319	88,23	121,39	2529
	Caso 3	B	74	0	56	0	317	0	43,63%	100,00%	43,01%	73,44%	-	OPTIMAL	0,000106	81,2	53,18	3378	
		I	74	0	56	0	317	0	43,62%	100,00%	17,48%	82,14%	98,43%	FEASIBLE	0,000197	82,04	120,11	3378	
	Semilla 80	Caso 0	B	54	0	53	0	190	0	32,26%	99,90%	53,45%	81,14%	-	FEASIBLE	0,000483	83,25	121,01	2538
			I	54	0	53	0	190	0	32,26%	99,95%	23,48%	84,93%	84,80%	FEASIBLE	0,000291	83,32	121,40	2538
		Caso 1	B	72	0	69	0	255	0	38,93%	99,75%	39,35%	70,84%	-	FEASIBLE	0,003207	72,37	122,46	3384
			I	72	0	69	0	255	0	39,05%	99,90%	32,86%	83,76%	81,80%	FEASIBLE	0,003223	72,94	121,64	3384
		Caso 2	B	54	0	53	0	190	0	32,26%	99,95%	49,47%	69,14%	-	FEASIBLE	0,000349	83,26	121,19	2538
			I	54	0	53	0	190	0	32,26%	99,98%	12,96%	81,92%	98,14%	FEASIBLE	0,000281	83,99	121,99	2538
	Caso 3	B	72	0	69	0	255	0	38,95%	99,75%	45,35%	73,84%	-	FEASIBLE	0,001207	75,37	120,23	3384	
		I	72	0	69	0	255	0	38,95%	99,95%	19,31%	79,15%	96,57%	FEASIBLE	0,001842	73,71	121,36	3384	
	Semilla 210	Caso 0	B	35	0	35	0	148	0	20,69%	100,00%	52,12%	82,77%	-	FEASIBLE	0,000226	82,38	121,21	1765
			I	35	0	35	0	148	0	20,70%	100,00%	14,48%	88,85%	84,60%	FEASIBLE	0,000212	82,48	121,03	1765
Caso 1		B	48	0	46	0	198	0	25,01%	100,00%	47,09%	74,43%	-	FEASIBLE	0,000271	73,1	120,57	2361	
		I	48	0	46	0	198	0	25,01%	100,00%	18,30%	85,01%	84,60%	OPTIMAL	8,92E-05	73,67	99,73	2361	
Caso 2		B	35	0	35	0	148	0	20,70%	100,00%	42,24%	81,30%	-	FEASIBLE	0,000224	82,38	121,14	1765	
		I	35	0	35	0	148	0	20,69%	99,95%	8,05%	81,39%	98,57%	FEASIBLE	0,000254	83,18	120,01	1765	
Caso 3	B	48	0	46	0	198	0	25,01%	99,95%	44,62%	79,27%	-	FEASIBLE	0,000285	73,1	121,12	2361		
	I	48	0	46	0	198	0	25,01%	100,00%	10,18%	77,29%	98,71%	FEASIBLE	0,000255	74,36	120,74	2361		
Semilla 250	Caso 0	B	76	0	68	0	358	0	50,53%	100,00%	64,43%	79,56%	-	FEASIBLE	0,000138	88,34	121,45	3617	
		I	76	0	68	0	358	0	50,53%	100,00%	35,08%	90,27%	84,20%	FEASIBLE	0,000144	88,12	121,51	3617	
	Caso 1	B	100	0	96	0	471	0	64,70%	100,00%	70,71%	86,22%	-	OPTIMAL	6,97E-05	82,17	36,93	4822	
		I	100	0	96	0	471	0	64,70%	100,00%	48,43%	89,01%	84,20%	OPTIMAL	8,17E-05	82,25	84,26	4822	
	Caso 2	B	76	0	68	0	358	0	50,53%	99,95%	41,70%	65,4							

			TOTAL			PORCENTAJES DE USO							
			P. A.	P. ATR.	P. NO A.	CONS.	QUIR.	C. EN C.	C. EN Q.	GAP	VALOR FO	Ejecución	
Escenario 1	α = 150 %	β = 150%	M. BÁS.	2942,2	8,6	221,8	23,41%	99,77%	42,08%	73,09%	0,15%	83,93	120,765
			M. INT.	2943,8	1,4	220,8	23,42%	99,92%	17,48%	76,59%	0,05%	83,55	120,771
		β = 200%	M. BÁS.	3536,4	0	471,4	29,16%	99,90%	47,81%	71,18%	0,05%	74,55	97,7773
	α = 200 %	β = 150%	M. INT.	3536,8	0,2	471,4	29,14%	99,95%	21,74%	78,62%	0,03%	74,57	98,5116
			M. BÁS.	2944	1	221,2	23,42%	99,92%	36,76%	68,01%	0,05%	84,02	120,84
		β = 200%	M. INT.	2942	9	222,4	23,41%	99,75%	10,55%	72,75%	0,25%	84,52	120,843
Escenario 2	α = 150 %	β = 150%	M. BÁS.	7484,6	11,4	504	37,75%	99,97%	54,75%	79,27%	0,08%	85,93	120,965
			M. INT.	7487	3	502,6	37,76%	99,98%	26,81%	86,88%	0,03%	85,85	119,505
		β = 200%	M. BÁS.	9152,2	3	1098,6	47,43%	99,95%	57,12%	78,50%	0,07%	78,17	76,8518
			M. INT.	9155,4	2,2	1098,8	47,46%	99,98%	34,96%	86,53%	0,07%	78,43	103,92
	α = 200 %	β = 150%	M. BÁS.	7487,6	4,8	502,6	37,76%	99,97%	46,95%	73,30%	0,03%	85,97	121,45
			M. INT.	7487,6	3,2	502,8	37,76%	99,96%	15,74%	78,67%	0,03%	86,58	121,477
		β = 200%	M. BÁS.	9152,2	2	1097,8	47,44%	99,93%	52,46%	76,13%	0,03%	78,77	86,4064
			M. INT.	9155,8	3	1098,8	47,43%	99,99%	19,71%	81,56%	0,05%	79,17	101,912

Tabla 22 - Resumen para la comparación entre modelos

		ETAPA PREQUIRÚRGICA					ETAPA QUIRÚRGICA					ETAPA POSTQUIRÚRGICA					PORCENTAJES DE USO				GSC				
		P. A.	P. ATR.	ATR. M.	P. NO A.	ATR. M.	P. A.	P. ATR.	ATR. M.	P. NO A.	ATR. M.	P. A.	P. ATR.	ATR. M.	P. NO A.	ATR. M.	CONS.	QUIR.	C. EN C.	C. EN Q.					
MODELO INTEGRAL	Escenario 1: 2 consultas/1 quirófano	Semilla 30	Caso 0	1489	0	0	0	0	1249	0	0	195	10,69	1278	0	0	0	0	29,38%	99,95%	20,68%	81,18%	75,33%		
			Caso 1	2008	1	1	0	0	1517	0	0	435	17,48	1561	0	0	0	0	0	37,54%	99,85%	26,49%	77,26%	75,33%	
			Caso 2	1489	0	0	0	0	1249	0	0	195	10,69	1278	0	0	0	0	0	29,38%	99,95%	13,26%	70,44%	98,25%	
		Semilla 80	Caso 3	2008	0	0	0	0	1517	0	0	435	17,48	1561	0	0	0	0	0	37,54%	99,85%	17,97%	65,87%	98,50%	
			Caso 0	1285	5	1	0	0	994	0	0	270	16,87	988	0	0	0	0	0	28,78%	100,00%	21,90%	73,44%	75,67%	
			Caso 1	1726	0	0	0	0	994	0	0	524	19,85	1068	0	0	0	0	0	35,88%	99,95%	27,51%	75,82%	75,67%	
		Semilla 210	Caso 2	1285	4	1	0	0	954	0	0	272	16,78	988	0	0	0	0	0	28,78%	100,00%	13,07%	71,47%	97,25%	
			Caso 3	1726	0	0	0	0	994	0	0	524	19,85	1068	0	0	0	0	0	35,97%	99,95%	16,04%	71,74%	97,75%	
			Caso 0	799	1	1	0	0	563	1	2	166	10,05	583	0	0	0	0	0	14,98%	99,75%	13,22%	66,50%	75,67%	
		Semilla 250	Caso 1	1076	0	0	0	0	587	0	0	403	16,26	625	0	0	0	0	0	18,31%	99,95%	14,90%	76,37%	75,67%	
			Caso 2	799	3	1,33	0	0	558	5	2,6	171	10,43	578	33	10,73	0	0	0	14,93%	98,80%	6,84%	68,51%	97,75%	
			Caso 3	1076	0	0	0	0	587	0	0	403	16,21	625	0	0	0	0	0	18,33%	99,95%	8,83%	64,33%	99,50%	
	Escenario 2: 3 consultas/2 quirófanos	Semilla 30	Caso 0	904	0	0	1	27	659	0	0	176	9,36	670	0	0	0	0	0	18,02%	99,90%	12,94%	84,35%	73,67%	
			Caso 1	1219	0	0	0	0	718	0	0	424	14,73	744	0	0	0	0	0	22,31%	100,00%	17,69%	79,56%	73,67%	
			Caso 2	905	0	0	0	0	659	0	0	177	9,36	670	0	0	0	0	0	18,03%	100,00%	8,12%	75,89%	97,25%	
			Caso 3	1219	0	0	0	0	718	0	0	423	14,78	744	0	0	0	0	0	22,31%	100,00%	10,49%	69,96%	97,50%	
			Caso 0	1314	0	0	0	0	981	0	0	296	18,12	1003	0	0	0	0	0	25,94%	100,00%	18,68%	77,46%	75,25%	
		Semilla 80	Caso 1	1758	0	0	0	0	1013	0	0	571	19,68	1070	0	0	0	0	0	31,64%	100,00%	22,10%	84,07%	75,25%	
			Caso 2	1314	0	0	0	0	981	0	0	297	18,08	1003	0	0	0	0	0	25,94%	100,00%	11,48%	77,46%	95,95%	
			Caso 3	1758	0	0	0	0	1013	0	0	571	19,68	1070	0	0	0	0	0	31,52%	100,00%	14,33%	70,82%	95,95%	
			Caso 0	2587	0	0	1	29	2093	0	0	391	12,51	2160	3	2,33	0	0	0	34,88%	99,98%	27,29%	79,79%	84,00%	
			Caso 1	3452	0	0	0	0	2456	0	0	869	20,06	2545	0	0	0	0	0	43,63%	99,98%	31,36%	84,10%	84,00%	
		Semilla 210	Semilla 30	Caso 2	2588	0	0	0	2094	0	0	394	12,51	2161	0	0	0	0	0	0	34,90%	99,98%	15,18%	80,49%	98,29%
				Caso 3	3452	0	0	0	2457	0	0	871	20,01	2544	0	0	1	1	1	43,62%	100,00%	17,48%	82,14%	98,43%	
				Caso 0	2592	0	0	0	0	1930	0	0	578	18,07	1969	0	0	0	0	0	32,26%	99,95%	23,48%	84,93%	84,80%
			Semilla 80	Caso 1	3455	2	3,5	1	5	2010	0	0	1241	18,87	2104	9	4,56	1	1	1	39,05%	99,90%	32,86%	83,76%	81,80%
				Caso 2	2592	2	2	0	0	1930	0	0	577	18,06	1969	0	0	0	0	0	32,26%	99,98%	12,96%	81,92%	98,14%
	Caso 3			3455	6	1,67	1	2	2012	0	0	1244	18,89	2105	9	4,33	2	1	1	38,95%	99,95%	19,31%	79,15%	96,57%	
	Semilla 250		Caso 0	1800	0	0	0	0	1310	0	0	387	8,76	1352	0	0	0	0	0	20,70%	100,00%	14,48%	88,85%	84,60%	
			Caso 1	2409	0	0	0	0	1413	0	0	862	14,43	1493	0	0	0	0	0	25,01%	100,00%	18,30%	85,01%	84,60%	
Caso 2			1800	0	0	0	0	1310	0	0	387	8,79	1352	0	0	0	0	0	20,69%	99,95%	8,05%	81,39%	98,57%		
Caso 3			2409	0	0	0	0	1412	0	0	862	14,4	1493	0	0	0	0	0	25,01%	100,00%	10,18%	77,29%	98,71%		
Caso 0		3693	8	1,5	0	0	3024	0	0	576	14,04	3088	0	0	0	0	0	50,53%	100,00%	35,08%	90,27%	84,20%			
Caso 1		4922	0	0	0	0	3570	0	0	1283	19,92	3697	0	0	0	0	0	64,70%	100,00%	48,43%	89,01%	84,20%			
Caso 2		3693	8	1,88	0	0	3024	0	0	576	14,04	3088	2	2,5	0	0	0	50,53%	99,95%	20,85%	76,03%	98,29%			
Semilla 350	Caso 3	4922	0	0	0	0	3570	0	0	1277	20	3697	0	0	0	0	0	64,70%	100,00%	24,94%	84,93%	98,57%			
	Caso 0	3709	4	1	0	0	3032	0	0	580	13,55	3096	0	0	0	0	0	50,43%	99,95%	33,74%	90,58%	81,41%			
	Caso 1	4945	0	0	0	0	3600	0	0	1237	20,7	3706	0	0	0	0	0	64,89%	100,00%	43,87%	90,78%	81,41%			
	Caso 2	3709	4	1	0	0	3032	0	0	580	13,54	3096	0	0	0	0	0	50,43%	99,95%	21,68%	73,53%	97,27%			
	Caso 3	4945	0	0	0	0	3600	0	0	1236	20,72	3706	0	0	0	0	0	64,89%	100,00%	26,65%	84,28%	97,41%			

Tabla 23 - Resumen para la comparación entre soluciones del modelo integral

	E1				E2				E3			
	B	I $\alpha=150\%$	B	I $\alpha=200\%$	B	I $\alpha=150\%$	B	I $\alpha=200\%$	B	I $\alpha=150\%$	B	I $\alpha=200\%$
w1	17,2	15	13	17,2	13,6	15	13,8	13,8	12,4	15,8	9,8	13,2
w2	14,2	12,8	19,6	18,2	15,4	13,4	16	17,4	20,4	14,6	14,8	9,2
w3	17,6	18,2	21,2	15,2	13,4	12,2	14,8	13,8	21	22,2	17,6	16
w4	18,6	17,2	11	19,6	15,8	13	14,6	14,4	26,4	19,6	34	42
w5	21,2	21,4	21,6	17,2	13,8	15,2	13,8	12,6	13,8	24,6	18	14,6
w6	16	20	16	17,6	11,4	14	14,8	11,2	12	7,4	13,6	16,6
w7	15,6	16,4	22,4	16,4	14,2	12,6	12,2	16	9,6	5,6	6,8	4,2
w8	25,2	17,6	15,8	19,2	13,4	15,2	13,8	18,2	8,2	4,4	8,2	10,2
w9	19,8	24	18,2	21,8	17,2	14,8	13	15,8	8	11,6	10	7,8
w10	16	25,6	21,6	22,6	15,2	15,8	13	16,2	6	12,4	4,8	8,4
w11	16	18,8	18	14,4	16,4	15,6	13,8	14	10	15,4	16,6	5,4
w12	13,6	12,2	15,6	16,2	14	14,4	14	13,8	13	6,6	12,4	7,4
w13	22	23,6	24,4	12,6	17,6	12,4	13,2	11,8	8	8,6	4	9,6
w14	16	20,6	17,4	25,2	16,6	20,8	15,4	15,4	10,6	7,8	13	10,2
w15	22,6	18,4	19,6	27	15,4	18,6	14,2	16,6	15,8	21,2	14	14,8
w16	27,4	18,2	23,2	18,8	12,8	13	11,6	16,8	11,4	17,4	5,2	20,8
w17	28,6	18,4	17,6	26,4	13,4	16,2	20,4	20,4	13	22	11	6
w18	21,6	18,8	21,6	23,8	20,2	13,8	14,8	20,4	13,6	19,8	17	12
w19	18,6	19	18,8	21,8	15,2	16,8	18,4	19,4	11,4	12,2	26,2	18,8
w20	16,2	22	24,6	12,6	14,6	16,8	12,6	14,8	9,4	10	10,2	38,6
w21	27,8	20,4	23,8	18,2	15,4	17,4	19,6	13,4	32	12,2	18	24
w22	16,2	25,2	27	20,2	13,8	13,2	19,4	17,4	24,6	11,6	13	16,4
w23	25	15	25,8	20,8	12,8	19,6	14,4	11,8	13,4	17,2	12,6	17,8
w24	27,8	32,8	21,6	20,4	15,4	14	14,4	14	12	26,4	15,4	6,8
w25	17,6	24,8	23,8	27,8	14,8	16	15,8	19,6	8,6	12,6	19,8	25,2
w26	12,6	19,4	18,4	35	14,2	17,2	15,2	14	16,2	12	23,4	11,2
w27	24,4	20,2	24,4	14,4	13,6	18,2	19,4	14	14,4	20,2	6,6	9
w28	17,6	21,6	13,6	13,6	20,2	20	16	14,6	11,4	13,8	12,8	8,2
w29	22,8	25	13,6	9,6	14	14,6	14,6	14	7,2	12,6	22,2	14,2
w30	14,4	12,8	11	19,4	14	18,6	20,6	14,6	10,4	8,2	4,4	26,2
w31	22	18	22,6	28,2	20	14,8	16	14,4	14,2	21,2	16,6	5,2
w32	16,8	21,2	27	14,8	19,8	14	13,6	21,8	26,4	10,6	17,8	10,8
w33	33,6	25	33,6	26	17,4	18,4	20	20	12,2	6,4	14,2	15,8
w34	17,2	22,6	25,2	27	19	14,2	20	13,8	21,2	14,8	16,4	17,4
w35	26	23,8	21	26,2	20	15,6	18,2	14,6	9,2	18,2	14,6	7
w36	23,6	24,4	16,6	18	20,4	15	14,6	21,4	15,2	10,2	11,4	10,2
w37	28,2	23,2	20,8	23	16,2	20,6	20,2	20,4	17,2	7	13,8	2,6
w38	23,4	19,8	19,6	23,8	20,6	17	17	20	7,4	21,8	22,2	8,4
w39	18,4	36	24,4	27,8	15,8	20,4	20,6	16,8	17,4	29,4	15,2	28,8
w40	22	22,2	33	22,8	21,6	21	21,4	20,4	30,8	24,8	27,6	24
w41	28	22,2	23,8	25,4	22	20,8	21	21,6	8,8	13	18,8	25,2
w42	21,8	17,4	21,2	21,4	22	22,6	22,4	22,6	10,6	8,6	10,4	13,2
w43	27,2	25,2	24,2	30,6	21,4	22	22	17,8	21,8	9,6	16,4	15,2
w44	22,2	20,8	19	20,2	21,8	21,2	21,8	21,2	20,8	14,8	15,2	6,2
w45	23,2	16,6	19	20,4	21,8	21,8	21,8	21,8	31,2	13,2	17	30,6
w46	22,8	28,4	28,2	22,8	20,6	21	21	21	17,6	20,4	26,2	10,8
w47	22,2	25,6	22,8	26,2	21,4	21,4	21,4	19,6	27,6	25,2	19,4	40,4
w48	20,8	18,6	22,4	21	21,2	20,6	21,2	21,2	17	24	20,2	25,8
w49	28,4	30	25,2	28,2	16,4	14,6	14	15,8	36	50,2	37,8	44
w50	31,6	31,8	34,4	36,6	14,6	17,6	15,2	17	24,6	27,6	26,6	27,6
w51	36,8	46,4	37	39,4	17,6	16,2	19,2	15,6	51,4	39,2	46,6	36,8
w52	52	43,6	53,2	45,4	21	21	21	21	60,6	68,2	64,6	52,6

Tabla 24 - Planificación promedio de las cinco semillas para el escenario 1 con $\beta = 150\%$

	E1				E2				E3			
	B	I $\alpha=150\%$	B	I $\alpha=200\%$	B	I $\alpha=150\%$	B	I $\alpha=200\%$	B	I $\alpha=150\%$	B	I $\alpha=200\%$
w1	19	17	17,4	11	12,6	12,8	12,8	14,6	14	22,2	14,8	20,4
w2	15	16,4	15,4	22,2	16,2	16,6	16,4	15	23,4	19,8	18	13,4
w3	12,6	21,6	19,2	11,6	14,6	12,2	18	13	31,8	34,8	27,6	30,6
w4	21,6	15,4	15,2	21,6	14,6	13,6	14,6	14,8	38	33,4	46	47,6
w5	26,2	22,6	32,2	23,4	17,2	14	15,4	18,2	19,6	17,8	22,8	18,6
w6	27,2	19,8	18,6	25,2	11,8	11,4	15	14,4	13,2	10,2	13,8	10,4
w7	23,8	32,8	20,6	24,8	15	16	14,8	15,2	5,8	4,2	8	7,4
w8	16,4	25,6	27,4	26,2	16,8	14,4	16,8	15,4	6,4	8,4	9,6	10,6
w9	25,2	35	23,6	27,8	13,8	13,6	13,8	19,6	3,4	9,8	4,2	10,8
w10	31	31,6	33,8	30,4	17,4	14,4	13,4	19,6	6,8	6,8	11,2	8,8
w11	23,8	28	33,6	30,6	14	18,2	14	19,2	9,6	9,4	10,2	7,2
w12	23,4	29,4	24,4	30,8	14	14	19,8	20	15,4	12,6	15,8	15
w13	31,4	23,4	14,6	25,6	12,4	12,4	12,8	18,6	17	8,8	12,6	24,2
w14	22,4	20,8	32,2	22,6	14,2	20,2	20	17,6	11,6	16,6	13,2	17,4
w15	24,4	25,6	19,4	24,4	15,8	20	20	16,2	12,4	16,2	12,8	12,8
w16	42	16,6	25,8	22,6	14	17,8	12,8	14	18	21	9,6	15,2
w17	19,8	30,6	25,4	25,6	21	20	14,6	16,8	22,2	17,6	11,6	19,4
w18	31,2	21,4	26,8	25,4	20,2	18,2	16,8	17,6	10,6	15,6	28,8	13,2
w19	28,8	30	28,2	35,6	19,8	13,4	18,2	15,2	8,2	10	13,4	16,4
w20	22	17	24,2	28,6	17,8	17,2	19,8	19,2	12	23,8	20	22,2
w21	25,2	23,2	38,8	30,2	19,8	19	17,8	18,6	21,6	18,8	14,2	20,4
w22	32	32,6	28,8	28,4	19,4	18	19,6	19,2	14,4	14	16,2	15,2
w23	30,6	40,6	22	25,4	16	17,6	19,2	15,6	15,4	13	18,4	15
w24	30	20,2	29,6	33,4	15,8	17,4	20,4	19,2	19,6	25,2	14,6	23
w25	40,2	34,6	35,4	36	19,8	21	13,6	19,4	1,4	12	7,4	13,4
w26	21,8	33,4	28,6	21,8	20	16,2	20,8	18	28,4	15,4	14,8	20,6
w27	25,8	40	36,4	25	20,4	20,6	20,4	20,4	18,6	17,4	2	9,6
w28	36,6	43	27,4	37,6	14,8	19,2	20,6	14	17,8	18,8	22,2	25,2
w29	30,4	26,2	34,4	32,4	20,6	20,6	14,4	18	19,2	17,6	28	30
w30	33,8	34,2	31,2	23,6	15,8	17	21,8	15,8	29,4	2,2	24,2	11,4
w31	39,6	33,2	27,2	41	18,4	21,4	15,6	20,4	14,4	20,8	22,6	12,4
w32	23,2	26,8	34,8	23,8	21,6	21,4	20,6	19,6	22,2	22,2	21,4	5,2
w33	24	20,8	24,8	25,2	20,8	20,2	16,6	22	14,4	1,8	18,6	14,2
w34	15,4	25,8	24,2	19,6	21,8	20,6	17,6	20	11	9,4	12	6,4
w35	31,4	18	23,8	23,4	21,4	22,6	21,4	20,2	4,8	14	29,2	13,6
w36	34,8	19	35,2	28,6	22,6	22,6	22	19,6	11,4	23	16,8	7,6
w37	20	34,4	31,6	29,2	22,6	19	22,6	19,6	9,4	25,4	9,6	25,4
w38	29,4	26,6	34,8	30,8	22,6	21,4	22,6	22,6	24,2	27,4	27,6	13
w39	43,2	40,2	24	41,6	22,6	22,6	22,6	20,2	11	18,2	14,8	20,4
w40	31,4	39	23,2	31,2	22	22	22	22	29,2	28,4	25	13,4
w41	32,4	38,2	39,4	25,8	22,6	22,6	22,6	22	33,4	34,4	16	28,8
w42	31,2	25	26,2	34,4	22,6	22	22,6	16,6	16,2	5,8	4,8	7,6
w43	22	25,8	32,8	31,4	22	22	22	20,8	35	23,6	17,6	21,2
w44	26,6	24,8	32,4	25	21,8	21,8	21,8	21,8	20,6	37,8	36	26,4
w45	25,2	27,4	23,8	33,6	21,8	21,8	21,8	21,8	13,8	30	9,2	54,8
w46	36,4	29,6	31,8	28,4	21	21	21	21	28	27,8	29,6	7,4
w47	25,8	22,2	24	24,4	22,6	22,6	22,6	22,6	40,2	24,6	35,4	23,6
w48	29,6	30,6	30,8	31,8	21,8	21,8	21,8	21,8	16,8	14,4	15,6	29,6
w49	34,4	36,2	35,2	31	15	15	15,2	15	40,2	40,6	21,4	29,2
w50	47,6	48,6	50,6	56,6	20,4	20,4	20,4	20,4	25,8	13,4	41,8	48,4
w51	77,4	78,4	73	73,4	21	21	20,8	21	59,4	42,8	35,2	20,4
w52	82,8	78,2	83,2	77,4	21	21	21	21	46,8	54,4	67,2	59,2

Tabla 25- Planificación promedio de las cinco semillas para el escenario 1 con $\beta = 200\%$

	E1				E2				E3			
	B	I $\alpha=150\%$	B	I $\alpha=200\%$	B	I $\alpha=150\%$	B	I $\alpha=200\%$	B	I $\alpha=150\%$	B	I $\alpha=200\%$
w1	48,8	47	53,4	51,4	33,6	35,2	32	35	20	38	24,2	28
w2	49,4	38,8	42,4	42,8	38	37	41,4	40,4	46,2	35,8	37,8	25
w3	42	40,2	39	32,4	32,6	35,8	37	36,4	47,4	44,2	31,6	41,4
w4	55,8	59,6	50,6	45,6	36	35,6	41	31,8	59	64	71,8	95
w5	46,4	43	40,8	64,2	42,6	39,2	41,2	43	82	68,6	78	61,6
w6	39,4	57,4	56,2	51,8	28	33,8	26,2	27	12,4	25,6	23,8	27,8
w7	41	55,4	63,6	49,8	37,2	33,6	44,8	35,8	10	21,2	10,6	14,2
w8	56,4	37	36,6	49,8	33,8	43,8	32,8	34,6	13,4	20,2	12,2	14,8
w9	35,4	40,6	36	37,2	44,8	39,4	42,4	47	22,4	19	12,6	18
w10	64	49,8	50,2	48	29,4	29,2	31	34,8	17,4	16,2	18,8	27,6
w11	39,2	29,4	72,4	65,4	36,2	36,8	35,4	38,4	29,2	27,6	22,6	37,4
w12	54	51	56,2	45,6	38,8	38	35,6	38,6	25,8	42,8	16,8	17,8
w13	40,8	37	26	38,8	38,6	38,4	39,2	34,6	21	23,6	33	31,2
w14	52,2	59	40,6	37,8	37,8	41,4	39,8	36,4	37,6	20,2	27,8	40,8
w15	37,2	46,4	63	26	36,4	41,6	39	37,2	18,8	13,2	39	35,8
w16	49,6	51,8	59,4	70,4	32,2	39,4	39,2	33,8	23,2	45	25,4	37,2
w17	61,4	69,4	43,2	43	27,6	36,4	48,6	42,4	24,6	31	32,8	42,2
w18	58,2	57,8	48,6	64,6	34,2	41,8	39,8	32,4	19,2	38,2	49	53
w19	47,4	48	30,2	56,8	36,6	36,8	39,4	34,8	53,8	63,2	33	25,4
w20	36	47,8	49,6	50,2	32,8	40,2	36,8	34	33,6	47	52,4	47,6
w21	48,8	51,2	62,4	65,2	42,4	44,8	34	32,6	51,4	30	22,2	36,6
w22	60,8	46,2	44,8	39,4	36	31,6	38	43	41,8	39,6	58,4	29,2
w23	40,4	65	51,8	54,2	40	38,2	30	32,4	30,8	30,6	41,4	33,8
w24	64,8	63	61,2	62	54,2	40,8	36,2	42,2	30	45,4	37,2	53,4
w25	59	53,2	44	58,2	38,8	44	28,8	35,2	46	62,8	40	31,2
w26	34	55	58,2	67,8	43,8	47,8	42	40,6	32,6	32,6	32,4	32,8
w27	65,6	47,6	62,6	48	42,6	51,2	38	53,6	38,8	43,4	27	20,4
w28	37,2	62,8	55,4	45	44,8	38,4	45,6	47,2	17,6	18,6	44,8	43
w29	61,8	42,4	59,2	49,4	36	43,4	34,4	43,2	54,6	26,6	26	26,8
w30	63	49,4	61,2	47,2	46,8	41,4	39	55,6	33	43	44,4	22,2
w31	67,6	58,6	40,6	59,4	44,6	44,8	48,4	41,8	60	23,2	35	42,4
w32	62,8	44,6	64	61	41	39	47	43	60,2	34,4	52	52,2
w33	57,2	67,4	63,6	57,2	49,8	41,4	52,4	45,6	35,8	31,2	48,8	35,2
w34	63	45,2	53	54,4	51,8	44,8	46,6	44,2	38,8	41,8	65	20
w35	53,6	68,2	50,4	56,4	59	38,4	52,2	58,4	54,6	22,6	55,2	34,2
w36	54,2	51,4	64,4	43,4	59	53,2	56,2	52,8	46,2	26,8	45,2	33,2
w37	58	55,4	53,8	47	55,2	56,8	57,4	54	26,8	43	43,2	46,6
w38	76,6	61,4	61,4	41,6	57,4	53,2	60,4	54,2	30	19,4	39,4	37,8
w39	48,2	63,2	61	95,6	61,2	54,2	53,4	56,6	53,4	72,2	26	68,2
w40	62,2	64	51,8	51,2	53,8	54,6	58,2	57,4	46,8	48,2	23,8	56,8
w41	66,8	50,6	57,8	65,8	56	55,2	56	52,4	17,2	72,4	29,4	39,4
w42	47	75,4	80,2	62,8	56,2	59,6	58,2	57,2	40,2	63,6	44,8	31,8
w43	53,6	55,6	61	62,8	54,8	53	60,6	54,4	54,8	37,4	29,4	62,6
w44	63,6	55,6	50,8	64,2	54,8	53,4	55,4	52	58	50,4	52,2	48
w45	58,4	70,4	61	61	54,4	52,6	56	56,6	59,2	53,8	76,6	41
w46	60,8	55	54,2	52,2	56,6	53	53,6	54,4	65,2	55,8	61,8	82,6
w47	50,6	48,6	43,4	37,2	56	56,2	55	58	59,4	88	68,2	62,6
w48	52,2	52,8	61	61	40	40,2	38,4	39,4	92,8	44,8	82,6	101,8
w49	62,8	65	51	67,2	28,8	28,4	28,8	24	121,4	76,2	122,8	83,4
w50	67	61,2	72,2	68	47,4	48	49	49,2	123	123,2	84,6	102,4
w51	60	73,2	57,4	67,2	51,6	54	54,6	51,2	96,2	95,2	122,6	79,2
w52	139,6	131,2	143,6	131,8	54,6	53,6	51,6	55,6	98,6	132,2	97,6	120,6

Tabla 26- Planificación promedio de las cinco semillas para el escenario 2 con $\beta = 150\%$

	E1				E2				E3			
	B	I $\alpha=150\%$	B	I $\alpha=200\%$	B	I $\alpha=150\%$	B	I $\alpha=200\%$	B	I $\alpha=150\%$	B	I $\alpha=200\%$
w1	39,8	45,4	41,8	45,6	33,8	37	31,4	33,2	30,2	40,4	22,4	29
w2	57,8	25,6	43,6	53,8	43,8	40,6	36	40,4	65	45,2	66,6	36,4
w3	49	57,8	40,4	33,6	36,4	32,4	33,2	33,6	51,4	61,6	48	45,6
w4	60,2	51,4	67,6	61,2	29,6	36,4	34	35,4	81,6	113,2	98	132,4
w5	56,2	66,8	69,6	54,8	38	40,4	38	40,2	92,8	45,4	84,4	77,2
w6	69,2	60,8	56,6	55,8	43,6	33	39,2	34	30,2	30	33,2	24,2
w7	39,2	54,2	53,4	64,8	38,4	43,4	48	39,2	9	18,8	10,6	12,2
w8	80,4	86,2	68,8	58,4	38,4	47	42,8	44,6	10,8	17,4	14,4	10,2
w9	58,6	35,8	48	65	47,4	38,2	37,4	41,6	10,2	23,4	8,2	22,2
w10	64	66,2	47,2	54,2	48,6	38	45,2	50,8	14,2	31	12,4	18
w11	54,2	63,6	85,2	78	40,8	34,8	36,2	39,2	20,8	20,8	16	31,6
w12	65	74,6	65,4	71,4	43,2	36,4	58	49,4	21,6	28	19	33,6
w13	59,6	77,6	65,4	82,2	42,8	38,8	34,8	44,8	42,4	23	33,8	43,8
w14	73,4	56	77,8	68	48	41,4	58,4	54,2	36,8	39,4	20,4	34,2
w15	65,2	66,4	72	65	58,6	49,6	51,2	44,6	32	32,8	25	35,2
w16	59,8	74,8	94,8	80,8	41,4	47,2	40,2	38,4	19,2	37,2	25,2	47,6
w17	91	67,6	63,2	59,2	48,2	55,8	48,4	53,6	49,2	46,6	33	24,4
w18	92	83	61	89	48	46,4	46,2	40,4	17,6	29,2	38,8	67,8
w19	69,2	70	97	55	42	49,2	46,6	51	40,6	19	40	57,4
w20	85,2	107,4	68,4	76,2	50,4	52,6	50	48,8	31,8	53,2	57,2	63,4
w21	65,6	63,6	74	84,8	46,2	47,6	50,4	48,4	17,6	66,4	30,6	61,8
w22	72	66,2	62,6	54,4	49,4	57,6	50,8	50,4	49,6	60,6	88,6	24,8
w23	71,4	59,6	53	71,8	51,6	52,2	49,6	59,2	38,4	63,2	42,4	41,4
w24	78,6	104,4	85,6	98	52	61	60,4	54,8	78	41	57,8	33,6
w25	66	67,2	82,8	55,2	55,6	56,4	55,2	53,4	55,4	83,2	84	51
w26	74,6	55,6	78	93,2	52	54,6	55,8	56	48,4	28,8	26	44,2
w27	99,2	93,4	78	56	53	54	54	53,4	54,2	21,4	56,6	52,8
w28	68,6	72,4	73,8	83,8	55,2	55	55	57	77,6	46,2	53,2	40,8
w29	57,4	60,2	65,4	64	57,8	54,8	56	56	53,4	26,8	56	52,2
w30	84,6	77,6	83,6	75,4	58	57,4	52,2	53	55	54	51	41,2
w31	65,2	75	75,8	87,4	58,8	59,2	63,8	55,8	31	26,8	32,6	40,2
w32	79,6	82,6	80,8	88,8	56,4	54,8	51,2	52,8	43,2	85,2	27,2	80
w33	79,6	92,4	78,6	62,4	55,2	56,8	55,4	55,2	73,8	36,8	47,2	19,4
w34	70,8	92,2	67,4	99,8	51,2	48,6	51,4	49,2	50,6	53,2	55,6	39,4
w35	87,8	51,8	94,4	64,6	56,4	45,6	58	42	51	53,6	56,6	58,6
w36	74	65,4	74	69	61,6	53,6	52	55	27	44,2	45,4	68,2
w37	83	53,8	58,8	56,4	56,2	58	61,2	55,8	50,8	44,6	62,6	50,6
w38	70,8	98,8	74,2	96,8	56	55,4	53	56,2	52,2	25,6	81	36
w39	68,4	89	71	73	56	57	56	55,6	69,8	82,8	56	57,6
w40	81,2	69	82	83,8	57,4	55,8	55,2	54,4	65,2	77,8	58,2	65
w41	68	75,4	74	72	57,2	56,2	60	55,8	45,8	58,6	61,4	32,6
w42	81	69,8	73,4	68,8	56,4	55,2	53,4	57,4	97,8	57,4	41	56,8
w43	75	72,4	77,2	67,6	56,4	58,4	58,8	58,4	61,6	71,6	71	34,4
w44	71	85,2	76,2	87,2	53,6	54,8	56,6	54	44,2	57,4	71,8	70
w45	86,4	71,2	90,4	82,2	57,4	57,4	57	58,4	83,2	64,6	79,6	77
w46	59,2	81,2	64,4	66	56,2	55,6	56	56,4	73	67,6	77,4	86,8
w47	77,2	69,4	63,8	56,2	56	57,2	57	57	70,2	61,4	71,8	54
w48	61,2	61,4	65,6	71,4	43,6	43	44,4	42,6	86,2	98,8	82,4	71,4
w49	77	67,8	74	76,2	47	46	46,4	47,4	106,2	122,2	90	138,2
w50	86,8	93,2	88	77,8	56,8	54,6	55,4	56,4	114	109,2	106,8	130,4
w51	121,4	126,8	115,2	141	55	58,4	54,6	54,8	102,2	74	100,8	66,6
w52	185	181,4	193,4	179,6	55,6	55,8	57,2	56,6	73	88,4	77,8	85,6

Tabla 27- Planificación promedio de las cinco semillas para el escenario 2 con $\beta = 200\%$

Anexo B. Código Python desarrollado

```
import winsound
import numpy as np
from openpyxl import *
from openpyxl.styles import *
from openpyxl.utils import *
from mip import *
import time

print("\nHORA DE INICIO: " + time.strftime("%H:%M:%S"))
inicio_total = time.time()

CASOS = [0,1,2,3]

SEMILLAS = [30,210,250,350,370]

ESCENARIOS = [0,1]

MODELOS = [0,1]

alpha_alta = 2

for modelo in MODELOS:
    print("\nMODELO - ", modelo)
    for escenario in ESCENARIOS:
        print("\nESCENARIO - ", escenario)
        for semilla in SEMILLAS:
            print("\nSEMILLA - ", semilla)
            for caso in CASOS:
                print("\nCASO -", caso)

                print("Hora de inicio del caso:", caso, "- " + time.strftime("%H:%M:%S"))
                inicio = time.time()

                rg = np.random.default_rng(semilla)

                if (escenario == 0):
                    n_quirofanos = 1
                    n_consultas = 2
                if (escenario == 1):
                    n_quirofanos = 2
                    n_consultas = 3

                if (caso == 0):
                    alpha = 1.5
                if (caso == 1):
                    alpha = 1.5
                if (caso == 2):
                    alpha = 2
                if (caso == 3):
                    alpha = 2

                # Número de turnos por semana
                n_turnos = 5
                # Minutos por turno
                min_turno = 480
                # Número máximo de semanas de vacaciones
                n_vacaciones = 5
                # Porcentaje mínimo de exceso de cirujanos
                min_ocupacion = 1.25

                # CONJUNTOS DEL MODELO
                # Número de tipos de intervenciones
                I = 3
                # Número de tipos de recursos
                J = 2
```

```

# Número de semanas
H = 52

# Disponibilidad del tipo de recurso j en la semana h
a_jh = [0 for j in range (J)]
for j in range (J):
    a_jh[j] = [0 for h in range (H)]

# La reducción de la disponibilidad de consultas y quirófanos se produce en ambos de forma aleatoria para la misma semana
for h in range (H):
    aux = rg.integers(1,9)
    for j in range (J):
        # Consultas
        if j == 0 and aux == 1:
            a_jh[j][h] = int((min_turno * n_turnos) * (n_consultas * 0.8))
        elif j == 0:
            a_jh[j][h] = int((min_turno * n_turnos) * n_consultas)
        # Quirófanos
        if j == 1 and aux == 1:
            a_jh[j][h] = int((min_turno * n_turnos) * (n_quirofanos * 0.8))
        elif j == 1:
            a_jh[j][h] = int((min_turno * n_turnos) * n_quirofanos)

# Número de cirujanos
C = int((n_consultas + n_quirofanos * 2) * alpha_alta)

# Prioridad de las vacaciones
prioridad_vacaciones_ch = [0 for c in range (C)]
for c in range (C):
    prioridad_vacaciones_ch[c] = [0 for h in range (H)]

for c in range (C):
    for h in range (H):
        if (h < 3): # REYES
            prioridad_vacaciones_ch[c][h] = rg.integers(8,11)
        if (3 <= h < 12): # NORMAL
            prioridad_vacaciones_ch[c][h] = rg.integers(0,4)
        if (12 <= h < 15): # SEMANA SANTA
            prioridad_vacaciones_ch[c][h] = rg.integers(4,8)
        if (15 <= h < 25): # NORMAL
            prioridad_vacaciones_ch[c][h] = rg.integers(0,4)
        if (25 <= h < 38): # VERANO
            prioridad_vacaciones_ch[c][h] = rg.integers(6,11)
        if (38 <= h < 50): # NORMAL
            prioridad_vacaciones_ch[c][h] = rg.integers(0,4)
        if (50 <= h < 52): # NAVIDAD
            prioridad_vacaciones_ch[c][h] = rg.integers(8,11)

# Semanas de permiso por matrimonio
matrimonio_ch = [0 for c in range (C)]
for c in range (C):
    matrimonio_ch[c] = [0 for h in range (H)]

auxc = [0 for c in range (C)]
auxh = [0 for h in range (H)]

for h in range (H):
    for c in range (C):
        if (auxc[c] == 0 and auxh[h] == 0):
            matrimonio_ch[c][h] = rg.integers(1,5201)
            if (matrimonio_ch[c][h] < 4):
                matrimonio_ch[c][h] = 1
            else :
                matrimonio_ch[c][h] = 0
            if (matrimonio_ch[c][h] == 1):
                auxc[c] = 1
                for k in range (h, h + 2):
                    if (k < H):

```

```

        matrimonio_ch[c][k] = 1
        auxh[k] = 1
    break

# Formaciones
formacion_ch = [0 for c in range (C)]
for c in range (C):
    formacion_ch[c] = [0 for h in range (H)]
duracion_formacion_c = [0 for c in range (C)]

auxc1 = [0 for c in range (C)]
auxh1 = [0 for h in range (-1,H)]

for h in range (H):
    for c in range (C):
        aux = 0
        if (auxc1[c] == 0 and auxh1[h] == 0):
            formacion_ch[c][h] = rg.integers(1,5201)
            if (formacion_ch[c][h] < 10):
                duracion_formacion_c[c] = rg.integers(1,5)
                auxc1[c] = 1
                if (h + duracion_formacion_c[c] < H):
                    for k in range (duracion_formacion_c[c]+1):
                        aux = aux + auxh[h+k]
                    if (aux == 0):
                        for k in range (h, h + duracion_formacion_c[c]):
                            formacion_ch[c][k] = 1
                            auxh1[k] = 1
                            break
                    else:
                        formacion_ch[c][h] = 0
                else:
                    formacion_ch[c][h] = 0
            else :
                formacion_ch[c][h] = 0

if (caso == 0):
    beta = 1.5
if (caso == 1):
    beta = 2
if (caso == 2):
    beta = 1.5
if (caso == 3):
    beta = 2

# PARÁMETROS DEL MODELO
# Duraciones de cada etapa del tipo de intervención i
t_1i = [0 for i in range (I)]
t_2i = [0 for i in range (I)]
t_3i = [0 for i in range (I)]
for i in range (I):
    t_1i[i] = rg.integers(18, 36)
    t_2i[i] = rg.choice([60,120,180,240])
    t_3i[i] = rg.integers(18, 36)

# Nivel de habilidad del cirujano c
s_c = [0 for c in range (C)]
for c in range (C):
    s_c[c] = rg.integers(35, 100)

# Nivel de habilidad mínima para tratar un paciente con una intervención tipo i
s_i = [0 for i in range (I)]
for i in range (I):
    s_i[i] = rg.integers(0, 50)

# Tiempo de respuesta de cada etapa del tipo de intervención i
r_1i = [0 for i in range (I)]
r_2i = [0 for i in range (I)]

```

```

r_3i = [0 for i in range (I)]
for i in range (I):
    r_1i[i] = rg.integers(4, 7)
    r_2i[i] = rg.choice([6,25,52])
    r_3i[i] = rg.integers(4, 7)

    # Tiempo de espera mínimo entre etapas para el tipo de intervención i
a = rg.integers(1, 4)
b = rg.integers(4, 7)
e_12i = [0 for i in range (I)]
e_23i = [0 for i in range (I)]
for i in range (I):
    e_12i[i] = a
    e_23i[i] = b

    # Demanda para cada semana y listas de espera iniciales para cada etapa
d_ih = [0 for i in range (I)]
for i in range (I):
    d_ih[i] = [0 for h in range (H)]

LE1_inicial = [0 for i in range (I)]
LE2_inicial = [0 for i in range (I)]
LE3_inicial = [0 for i in range (I)]
for i in range (I):
    LE2_inicial[i] = [0 for h in range (e_12i[i])]
    LE3_inicial[i] = [0 for h in range (e_23i[i])]

tiempo_proceso_consulta = [0 for h in range (H + 4 + 7 + 1 + 5)]
tiempo_proceso_quirofano = [0 for h in range (H + 4 + 7 + 1 + 5)]

for h in range (H):
    if (h >= 0) and (h < 1): # CASO 0
        d_ih[i][h] = 0
        while (tiempo_proceso_consulta[h] < a_jh[0][h] * beta) and (tiempo_proceso_quirofano[h + e_12i[i]] < a_jh[1][h +
e_12i[i]] * beta) and (tiempo_proceso_consulta[h + e_12i[i] + e_23i[i]] < a_jh[0][h + e_12i[i] + e_23i[i]] * beta):
            i = rg.integers(0,I)
            LE1_inicial[i] = LE1_inicial[i] + 1
            tiempo_proceso_consulta[h] = tiempo_proceso_consulta[h] + t_1i[i]
            tiempo_proceso_quirofano[h + e_12i[i]] = tiempo_proceso_quirofano[h + e_12i[i]] + t_2i[i]
            tiempo_proceso_consulta[h + e_12i[i] + e_23i[i]] = tiempo_proceso_consulta[h + e_12i[i] + e_23i[i]] + t_3i[i]
            if (tiempo_proceso_consulta[h] > a_jh[0][h] * beta) or (tiempo_proceso_quirofano[h + e_12i[i]] > a_jh[1][h + e_12i[i]]
* beta) or (tiempo_proceso_consulta[h + e_12i[i] + e_23i[i]] > a_jh[0][h + e_12i[i] + e_23i[i]] * beta):
                LE1_inicial[i] = LE1_inicial[i] - 1
                tiempo_proceso_consulta[h] = tiempo_proceso_consulta[h] - t_1i[i]
                tiempo_proceso_quirofano[h + e_12i[i]] = tiempo_proceso_quirofano[h + e_12i[i]] - t_2i[i]
                tiempo_proceso_consulta[h + e_12i[i] + e_23i[i]] = tiempo_proceso_consulta[h + e_12i[i] + e_23i[i]] - t_3i[i]
                break
            LE3_inicial[i][h] = LE3_inicial[i][h] + 1
            tiempo_proceso_consulta[h] = tiempo_proceso_consulta[h] + t_3i[i]
            if (tiempo_proceso_consulta[h] > a_jh[0][h] * beta):
                LE3_inicial[i][h] = LE3_inicial[i][h] - 1
                tiempo_proceso_consulta[h] = tiempo_proceso_consulta[h] - t_3i[i]
                break
            while (tiempo_proceso_quirofano[h] < a_jh[1][h] * beta) and (tiempo_proceso_consulta[h + e_23i[i]] < a_jh[0][h +
e_23i[i]] * beta):
                i = rg.integers(0,I)
                LE2_inicial[i][h] = LE2_inicial[i][h] + 1
                tiempo_proceso_quirofano[h] = tiempo_proceso_quirofano[h] + t_2i[i]
                tiempo_proceso_consulta[h + e_23i[i]] = tiempo_proceso_consulta[h + e_23i[i]] + t_3i[i]
                if (tiempo_proceso_quirofano[h] > a_jh[1][h] * beta) or (tiempo_proceso_consulta[h + e_23i[i]] > a_jh[0][h + e_23i[i]]
* beta):
                    LE2_inicial[i][h] = LE2_inicial[i][h] - 1
                    tiempo_proceso_quirofano[h] = tiempo_proceso_quirofano[h] - t_2i[i]
                    tiempo_proceso_consulta[h + e_23i[i]] = tiempo_proceso_consulta[h + e_23i[i]] - t_3i[i]
                    break
            if (h >= 1) and (h < e_12i[i]): # CASO 1
                while (tiempo_proceso_consulta[h] < a_jh[0][h] * beta) and (tiempo_proceso_quirofano[h + e_12i[i]] < a_jh[1][h +
e_12i[i]] * beta) and (tiempo_proceso_consulta[h + e_12i[i] + e_23i[i]] < a_jh[0][h + e_12i[i] + e_23i[i]] * beta):

```



```

tiempo_proceso_consulta[h] = tiempo_proceso_consulta[h] + t_1i[i]
aux = aux + t_2i[i]
if (tiempo_proceso_consulta[h] > a_jh[0][h] * beta) or (aux > a_jh[1][h] * beta):
    d_ih[i][h] = d_ih[i][h] - 1
    tiempo_proceso_consulta[h] = tiempo_proceso_consulta[h] - t_1i[i]
    aux = aux - t_2i[i]
    break

LE2_inicial_total = [0 for i in range (I)]
LE3_inicial_total = [0 for i in range (I)]
for i in range (I):
    for h in range (e_12i[i]):
        LE2_inicial_total[i] = LE2_inicial_total[i] + LE2_inicial[i][h]
    for h in range (e_23i[i]):
        LE3_inicial_total[i] = LE3_inicial_total[i] + LE3_inicial[i][h]

# Tiempos de espera medios de las listas de esperas
semanas_espera_pacientes_LE1_inicial_i = [0 for i in range (I)]
semanas_espera_pacientes_LE2_inicial_i = [0 for i in range (I)]
semanas_espera_pacientes_LE3_inicial_i = [0 for i in range (I)]
for i in range (I):
    semanas_espera_pacientes_LE1_inicial_i[i] = [0 for k in range (LE1_inicial[i])]
    semanas_espera_pacientes_LE2_inicial_i[i] = [0 for k in range (LE2_inicial_total[i])]
    semanas_espera_pacientes_LE3_inicial_i[i] = [0 for k in range (LE3_inicial_total[i])]

for i in range (I):
    for k in range (LE1_inicial[i]):
        semanas_espera_pacientes_LE1_inicial_i[i][k] = rg.integers(0,r_1i[i]-1)
    for k in range (LE2_inicial_total[i]):
        semanas_espera_pacientes_LE2_inicial_i[i][k] = rg.integers(0,r_2i[i]-1)
    for k in range (LE3_inicial_total[i]):
        semanas_espera_pacientes_LE3_inicial_i[i][k] = rg.integers(0,r_3i[i]-1)

TEM1_i = [0 for i in range (I)]
TEM2_i = [0 for i in range (I)]
TEM3_i = [0 for i in range (I)]
for i in range (I):
    for k in range (LE1_inicial[i]):
        TEM1_i[i] = TEM1_i[i] + semanas_espera_pacientes_LE1_inicial_i[i][k]
    for k in range (LE2_inicial_total[i]):
        TEM2_i[i] = TEM2_i[i] + semanas_espera_pacientes_LE2_inicial_i[i][k]
    for k in range (LE3_inicial_total[i]):
        TEM3_i[i] = TEM3_i[i] + semanas_espera_pacientes_LE3_inicial_i[i][k]

for i in range (I):
    if (LE1_inicial[i] > 0):
        TEM1_i[i] = int(int(TEM1_i[i])/int(LE1_inicial[i]))
    else:
        TEM1_i[i] = 0
    if (LE2_inicial_total[i] > 0):
        TEM2_i[i] = int(int(TEM2_i[i])/int(LE2_inicial_total[i]))
    else:
        TEM2_i[i] = 0
    if (LE3_inicial_total[i] > 0):
        TEM3_i[i] = int(int(TEM3_i[i])/int(LE3_inicial_total[i]))
    else:
        TEM3_i[i] = 0

# VARIABLES NECESARIAS PARA LA NORMALIZACIÓN:
C = int((n_consultas + n_quirofanos * 2) * alpha)

LEC2_inicial = [0 for i in range (I)]
LEC3_inicial = [0 for i in range (I)]
for i in range (I):
    LEC2_inicial[i] = [0 for c in range (C)]
    LEC3_inicial[i] = [0 for c in range (C)]

for i in range (I):

```

```

for c in range (C):
    LEC2_inicial[i][c] = [0 for h in range (e_12i[i])]
    LEC3_inicial[i][c] = [0 for h in range (e_23i[i])]

total = [0 for i in range(I)]
for i in range (I):
    total[i] = [0 for h in range (e_12i[i])]

for i in range (I):
    for h in range (e_12i[i]):
        while total[i][h] < LE2_inicial[i][h]:
            c = rg.integers(0, C)
            if (s_c[c] >= s_i[i]):
                if ((formacion_ch[c][h] == 0) and (matrimonio_ch[c][h] == 0)):
                    LEC2_inicial[i][c][h] = LEC2_inicial[i][c][h] + 1
                    total[i][h] = total[i][h] + 1

total = [0 for i in range(I)]
for i in range (I):
    total[i] = [0 for h in range (e_23i[i])]

for i in range (I):
    for h in range (e_23i[i]):
        while total[i][h] < LE3_inicial[i][h]:
            c = rg.integers(0, C)
            if (s_c[c] >= s_i[i]):
                if ((formacion_ch[c][h] == 0) and (matrimonio_ch[c][h] == 0)):
                    LEC3_inicial[i][c][h] = LEC3_inicial[i][c][h] + 1
                    total[i][h] = total[i][h] + 1

LE2_inicial = [0 for i in range (I)]
LE3_inicial = [0 for i in range (I)]
for i in range (I):
    LE2_inicial[i] = [0 for c in range (C)]
    LE3_inicial[i] = [0 for c in range (C)]

for i in range (I):
    for c in range (C):
        LE2_inicial[i][c] = [0 for h in range (e_12i[i])]
        LE3_inicial[i][c] = [0 for h in range (e_23i[i])]

for i in range (I):
    for c in range (C):
        for h in range (e_12i[i]):
            LE2_inicial[i][c][h] = LEC2_inicial[i][c][h]
        for h in range (e_23i[i]):
            LE3_inicial[i][c][h] = LEC3_inicial[i][c][h]

total_demanda_1 = 0
total_demanda_2 = 0
total_demanda_3 = 0
for i in range (I):
    for hp in range (H):
        total_demanda_1 = total_demanda_1 + d_ih[i][hp]
        if (hp + e_12i[i] < H):
            total_demanda_2 = total_demanda_2 + d_ih[i][hp]
        if (hp + e_12i[i] + e_23i[i] <= H - 1):
            total_demanda_3 = total_demanda_3 + d_ih[i][hp]

total_LE1_inicial = 0
total_LE2_inicial = 0
total_LE3_inicial = 0
for i in range (I):
    total_LE1_inicial = total_LE1_inicial + LE1_inicial[i]
    if (e_12i[i] <= H - 1):
        total_LE2_inicial = total_LE2_inicial + LE1_inicial[i]
    if (e_12i[i] + e_23i[i] <= H - 1):
        total_LE3_inicial = total_LE3_inicial + LE1_inicial[i]

```

```

if(e_23i[i] <= H - 1):
    for c in range (C):
        for h in range (e_12i[i]):
            total_LE3_inicial = total_LE3_inicial + LE2_inicial[i][c][h]
for c in range (C):
    for h in range (e_12i[i]):
        total_LE2_inicial = total_LE2_inicial + LE2_inicial[i][c][h]
    for h in range(e_23i[i]):
        total_LE3_inicial = total_LE3_inicial + LE3_inicial[i][c][h]

disponibilidad_consulta = 0
disponibilidad_quirofano = 0
for h in range (H):
    disponibilidad_consulta = disponibilidad_consulta + a_jh[0][h]
    disponibilidad_quirofano = disponibilidad_quirofano + a_jh[1][h]

maximos_pacientes_atrasados_LE1 = 0
maximos_pacientes_atrasados_LE2 = 0
maximos_pacientes_atrasados_LE3 = 0
for i in range (I):
    maximos_pacientes_atrasados_LE1 = maximos_pacientes_atrasados_LE1 + LE1_inicial[i]
    for c in range (C):
        for h in range (e_12i[i]):
            maximos_pacientes_atrasados_LE2 = maximos_pacientes_atrasados_LE2 + LE2_inicial[i][c][h]
        for h in range (e_23i[i]):
            maximos_pacientes_atrasados_LE3 = maximos_pacientes_atrasados_LE3 + LE3_inicial[i][c][h]

if(maximos_pacientes_atrasados_LE1 == 0):
    maximos_pacientes_atrasados_LE1 = 1
if(maximos_pacientes_atrasados_LE2 == 0):
    maximos_pacientes_atrasados_LE2 = 1
if(maximos_pacientes_atrasados_LE3 == 0):
    maximos_pacientes_atrasados_LE3 = 1

maximo_atraso_LE1 = 0
maximo_atraso_LE2 = 0
maximo_atraso_LE3 = 0 # Máximo atraso posible: aquel que podría darse en los pacientes
for i in range (I): # de las LE iniciales que tienen más semanas de espera asociados
    if (maximo_atraso_LE1 < TEM1_i[i] + H - r_1i[i]):
        maximo_atraso_LE1 = TEM1_i[i] + H - r_1i[i]
    if (maximo_atraso_LE2 < TEM2_i[i] + H - r_2i[i]):
        maximo_atraso_LE2 = TEM2_i[i] + H - r_2i[i]
    if (maximo_atraso_LE3 < TEM3_i[i] + H - r_3i[i]):
        maximo_atraso_LE3 = TEM3_i[i] + H - r_3i[i]

if(maximo_atraso_LE1 == 0):
    maximo_atraso_LE1 = 1
if(maximo_atraso_LE2 == 0):
    maximo_atraso_LE2 = 1
if(maximo_atraso_LE3 == 0):
    maximo_atraso_LE3 = 1

maximos_pacientes_atrasados_1 = 0
maximos_pacientes_atrasados_2 = 0
maximos_pacientes_atrasados_3 = 0
for i in range (I):
    if (e_12i[i] < H - r_2i[i]):
        maximos_pacientes_atrasados_2 = maximos_pacientes_atrasados_2 + LE1_inicial[i]
    if (e_12i[i] + e_23i[i] < H - r_3i[i]):
        maximos_pacientes_atrasados_3 = maximos_pacientes_atrasados_3 + LE1_inicial[i]
    if (e_23i[i] < H - r_3i[i]):
        for h in range (e_12i[i]):
            for c in range (C):
                maximos_pacientes_atrasados_3 = maximos_pacientes_atrasados_3 + LE2_inicial[i][c][h]

for h in range (H): # Pacientes que potencialmente se pueden atrasar:
    if (h < H - r_1i[i]): # todos los que llegan antes de H - r_1i, es decir, todos los que llegan menos los que salen del H
        maximos_pacientes_atrasados_1 = maximos_pacientes_atrasados_1 + d_ih[i][h]

```

```

if (h < H - r_2i[i] - e_12i[i]):
    maximos_pacientes_atrasados_2 = maximos_pacientes_atrasados_2 + d_ih[i][h]
if (h < H - r_3i[i] - e_12i[i] - e_23i[i]):
    maximos_pacientes_atrasados_3 = maximos_pacientes_atrasados_3 + d_ih[i][h]

if (maximos_pacientes_atrasados_1 == 0):
    maximos_pacientes_atrasados_1 = 1
if (maximos_pacientes_atrasados_2 == 0):
    maximos_pacientes_atrasados_2 = 1
if (maximos_pacientes_atrasados_3 == 0):
    maximos_pacientes_atrasados_3 = 1

maximo_atraso_1 = 0
maximo_atraso_2 = 0
maximo_atraso_3 = 0 # Máximo atraso posible: aquel que podría darse en los pacientes
for i in range (I): # de las LE iniciales que tienen más semanas de espera asociados
    if (maximo_atraso_1 < H - r_1i[i]):
        maximo_atraso_1 = H - r_1i[i]
    if (maximo_atraso_2 < H - e_12i[i] - r_2i[i]):
        maximo_atraso_2 = H - e_12i[i] - r_2i[i]
    if (maximo_atraso_3 < H - e_23i[i] - r_3i[i]):
        maximo_atraso_3 = H - e_23i[i] - r_3i[i]

if (maximo_atraso_1 == 0):
    maximo_atraso_1 = 1
if (maximo_atraso_2 == 0):
    maximo_atraso_2 = 1
if (maximo_atraso_3 == 0):
    maximo_atraso_3 = 1

total_LE1 = 0
for i in range (I):
    total_LE1 = total_LE1 + LE1_inicial[i]

total_LE2 = 0
total_LE3 = 0
for i in range (I):
    for c in range (C):
        for h in range (e_12i[i]):
            total_LE2 = total_LE2 + LE2_inicial[i][c][h]

        for h in range (e_23i[i]):
            total_LE3 = total_LE3 + LE3_inicial[i][c][h]

prio = [0 for c in range (C)]
for h in range (H):
    for c in range (C):
        if(prioridad_vacaciones_ch[c][h] > prio[c]):
            prio[c] = prioridad_vacaciones_ch[c][h]

maxima_prioridad = 0
for c in range (C):
    maxima_prioridad = maxima_prioridad + n_vacaciones * prio[c]

# DEFINICIÓN DEL MODELO
Modelo = Model("Modelo_AH-MQ", sense = MAXIMIZE, solver_name = CBC)
Modelo.verbose = 0
Modelo.threads = 4

# VARIABLES DEL MODELO
# Etapa prequirúrgica
# Variable desagregada
X1_ichph = [[[[Modelo.add_var(name = "X1_ichph_" + str(i+1) + "_" + str(c+1) + "_" + str(hp+1) + "_" + str(h+1), var_type =
INTEGER) for h in range (H)] for hp in range (H)] for c in range (C)] for i in range (I)]
# Variable agregada
X1_ich = [[[[Modelo.add_var(name = "X1_ich_" + str(i+1) + "_" + str(c+1) + "_" + str(h+1), var_type = INTEGER) for h in
range (H)] for c in range (C)] for i in range (I)]
# Etapa quirúrgica, cirujano principal

```

```

# Variable desagregada
X2_ichph = [[[[Modelo.add_var(name = "X2_ichph_" + str(i+1) + "_" + str(c+1) + "_" + str(hp+1) + "_" + str(h+1), var_type =
INTEGER) for h in range (H)] for hp in range (H)] for c in range (C)] for i in range (I)]
# Variable agregada
X2_ich = [[[[Modelo.add_var(name = "X2_ich_" + str(i+1) + "_" + str(c+1) + "_" + str(h+1), var_type = INTEGER) for h in
range (H)] for c in range (C)] for i in range (I)]
# Etapa quirúrgica, cirujano auxiliar
X2p_ich = [[[[Modelo.add_var(name = "X2p_ich_" + str(i+1) + "_" + str(c+1) + "_" + str(h+1), var_type = INTEGER) for h in
range (H)] for c in range (C)] for i in range (I)]
# Etapa postquirúrgica
# Variable desagregada
X3_ichph = [[[[Modelo.add_var(name = "X3_ichph_" + str(i+1) + "_" + str(c+1) + "_" + str(hp+1) + "_" + str(h+1), var_type =
INTEGER) for h in range (H)] for hp in range (H)] for c in range (C)] for i in range (I)]
# Variable agregada
X3_ich = [[[[Modelo.add_var(name = "X3_ich_" + str(i+1) + "_" + str(c+1) + "_" + str(h+1), var_type = INTEGER) for h in
range (H)] for c in range (C)] for i in range (I)]
# Número de turnos
N_jch = [[[[Modelo.add_var(name = "N_jch_" + str(j+1) + "_" + str(c+1) + "_" + str(h+1), var_type = INTEGER) for h in range
(H)] for c in range (C)] for j in range (J)]

if (modelo == 1):
# Vacaciones
V_ch = [[[[Modelo.add_var(name = "V_ch_" + str(c+1) + "_" + str(h+1), var_type = BINARY) for h in range (H)] for c in
range (C)]

# RESTRICCIONES
# R1: Agregación de las variables desagregadas
for i in range (I):
for c in range (C):
for h in range (H):
Modelo += (xsum(X1_ichph[i][c][hp][h] for hp in range (H)) == X1_ich[i][c][h], "R1.1_" + str(i+1) + "_" + str(c+1) +
"_" + str(h+1))
Modelo += (xsum(X2_ichph[i][c][hp][h] for hp in range (H)) == X2_ich[i][c][h], "R1.2_" + str(i+1) + "_" + str(c+1) +
"_" + str(h+1))
Modelo += (xsum(X3_ichph[i][c][hp][h] for hp in range (H)) == X3_ich[i][c][h], "R1.3_" + str(i+1) + "_" + str(c+1) +
"_" + str(h+1))
# R2: Garantía de disponibilidad de recursos físicos
for h in range (H):
Modelo += (xsum((t_1i[i]*X1_ich[i][c][h] + t_3i[i]*X3_ich[i][c][h]) for i in range (I) for c in range (C)) <= a_jh[0][h],
"R2.1_" + str(h+1))
Modelo += (xsum((t_2i[i]*X2_ich[i][c][h]) for i in range (I) for c in range (C)) <= a_jh[1][h], "R2.2_" + str(h+1))
# R3: Garantía de niveles adecuados de habilidad
for c in range (C):
Modelo += (xsum((X1_ich[i][c][h] + X2_ich[i][c][h] + X3_ich[i][c][h] + X2p_ich[i][c][h]) for h in range (H) for i in range (I)
if s_c[c] < s_i[i]) == 0, "R3_" + str(c+1))
# R4: Impedimento de la planificación de pacientes para la semana h que llegan en h' > h
for h in range (H):
Modelo += (xsum(X1_ichph[i][c][hp][h] for c in range (C) for i in range (I) for hp in range (H) if (h < hp)) == 0, "R4.1_" +
str(h+1))
Modelo += (xsum(X2_ichph[i][c][hp][h] for c in range (C) for i in range (I) for hp in range (H) if (h < hp)) == 0, "R4.2_" +
str(h+1))
Modelo += (xsum(X3_ichph[i][c][hp][h] for c in range (C) for i in range (I) for hp in range (H) if (h < hp)) == 0, "R4.3_" +
str(h+1))
# R5: Secuenciación de las etapas
for i in range (I):
Modelo += (xsum(X1_ich[i][c][h] for c in range (C) for h in range (H)) <= xsum(d_ih[i][h] for h in range (H)) + LE1_inicial[i],
"R5.1_" + str(i+1))
for hp in range (H):
if hp == 0:
Modelo += (xsum(X1_ichph[i][c][hp][h] for c in range (C) for h in range (hp, H)) <= LE1_inicial[i], "R5.2_" + str(i+1) +
"_" + str(hp+1))
else:
Modelo += (xsum(X1_ichph[i][c][hp][h] for c in range (C) for h in range (hp, H)) <= d_ih[i][hp], "R5.3_" + str(i+1) +
"_" + str(hp+1))
for i in range(I):
for c in range(C):
Modelo += (xsum(X2_ich[i][c][h] for h in range(H)) <= xsum(X1_ich[i][c][h] for h in range (H - e_12[i])) +
xsum(LE2_inicial[i][c][h] for h in range (e_12[i])), "R5.4_" + str(i+1) + "_" + str(c+1))

```

```

    for hp in range(H):
        if hp < e_12i[i]:
            Modelo += (xsum(X2_ichph[i][c][hp][h] for h in range (hp, H)) <= LE2_inicial[i][c][hp], "R5.5_" + str(i+1) + "_" +
str(c+1) + "_" + str(hp+1))
        else:
            Modelo += (xsum(X2_ichph[i][c][hp][h] for h in range (hp, H)) <= X1_ich[i][c][hp - e_12i [i]], "R5.6_" + str(i+1) +
"_" + str(c+1) + "_" + str(hp+1))
        for i in range(I):
            for c in range(C):
                Modelo += (xsum(X3_ich[i][c][h] for h in range(H)) <= xsum(X2_ich[i][c][h] for h in range (H - e_23i[i])) +
xsum(LE3_inicial[i][c][h] for h in range (e_23i[i])), "R5.7_" + str(i+1) + "_" + str(c+1))
                for hp in range(H):
                    if hp < e_23i[i]:
                        Modelo += (xsum(X3_ichph[i][c][hp][h] for h in range (hp, H)) <= LE3_inicial[i][c][hp], "R5.8_" + str(i+1) + "_" +
str(c+1) + "_" + str(hp+1))
                    else:
                        Modelo += (xsum(X3_ichph[i][c][hp][h] for h in range (hp, H)) <= X2_ich[i][c][hp - e_23i [i]], "R5.9_" + str(i+1) +
"_" + str(c+1) + "_" + str(hp+1))
                # R6: Número de turnos
                if (modelo == 0):
                    for c in range(C):
                        for h in range(H):
                            Modelo += N_jch[0][c][h] + N_jch[1][c][h] <= n_turnos, "R6.1_" + str(c+1) + "_" + str(h+1)
                            Modelo += N_jch[0][c][h] <= n_turnos, "R6.2_" + str(c+1) + "_" + str(h+1)
                            Modelo += N_jch[1][c][h] <= n_turnos, "R6.3_" + str(c+1) + "_" + str(h+1)
                        for j in range (J):
                            for c in range (C):
                                for h in range (H):
                                    if j == 0:
                                        Modelo += N_jch[j][c][h] * min_turno >= xsum((X1_ich[i][c][h]*t_1i[i] + X3_ich[i][c][h]*t_3i[i]) for i in range(I)),
"R6.4_" + str(j+1) + "_" + str(c+1) + "_" + str(h+1)
                                    else:
                                        Modelo += N_jch[j][c][h] * min_turno >= xsum(((X2_ich[i][c][h] + X2p_ich[i][c][h])*t_2i[i]) for i in range(I)),
"R6.5_" + str(j+1) + "_" + str(c+1) + "_" + str(h+1)
                            if (modelo == 1):
                                for c in range(C):
                                    for h in range(H):
                                        if ((formacion_ch[c][h] == 0) and (matrimonio_ch[c][h] == 0)):
                                            # Si el cirujano está de vacaciones, no se le asignan pacientes (turnos)
                                            Modelo += N_jch[0][c][h] + N_jch[1][c][h] <= n_turnos * (1 - V_ch[c][h]), "R6.6_" + str(c+1) + "_" + str(h+1)
                                        if ((formacion_ch[c][h] == 1) or (matrimonio_ch[c][h] == 1)):
                                            # Si un cirujano está de permiso por matrimonio o de formacion no se le puede asignar ningún paciente
                                            Modelo += N_jch[0][c][h] == 0, "R6.7_" + str(c+1) + "_" + str(h+1)
                                            Modelo += N_jch[0][c][h] == 0, "R6.8_" + str(c+1) + "_" + str(h+1)
                                    for j in range (J):
                                        for c in range (C):
                                            for h in range (H):
                                                if j == 0:
                                                    Modelo += N_jch[j][c][h] * min_turno >= xsum((X1_ich[i][c][h]*t_1i[i] + X3_ich[i][c][h]*t_3i[i]) for i in range(I)),
"R6.9_" + str(j+1) + "_" + str(c+1) + "_" + str(h+1)
                                                else:
                                                    Modelo += N_jch[j][c][h] * min_turno >= xsum(((X2_ich[i][c][h] + X2p_ich[i][c][h])*t_2i[i]) for i in range(I)),
"R6.10_" + str(j+1) + "_" + str(c+1) + "_" + str(h+1)
                                            # R7: Aseguramiento de la participación del cirujano auxiliar en cada intervención
                                            for i in range (I):
                                                for h in range (H):
                                                    Modelo += (xsum(X2_ich[i][c][h] for c in range (C)) == xsum(X2p_ich[i][c][h] for c in range (C)), "R7.1_" + str(i+1) +
"_" + str(h+1))
                                                for i in range (I):
                                                    for c in range (C):
                                                        for h in range (H):
                                                            Modelo += (X2p_ich[i][c][h] <= xsum(X2_ich[i][k][h] for k in range (C) if k !=c), "R7.2_" + str(i+1) + "_" + str(c+1) +
"_" + str(h+1))
                                            # RESTRICCIONES RELACIONADAS CON LAS VACACIONES:
                                            if (modelo == 1):
                                                # RVACACIONES1: Número máximo de semanas de vacaciones en el horizonte temporal
                                                for c in range (C):
                                                    Modelo += (xsum(V_ch[c][h] for h in range (H)) == n_vacaciones, "RVACACIONES1_" + str(c+1))

```

```

# RVACACIONES2: Aseguramiento del número mínimo de cirujanos por semana
for h in range(H):
    Modelo += (C - xsum((V_ch[c][h] + matrimonio_ch[c][h] + formacion_ch[c][h]) for c in range(C)) >= int((n_consultas +
2 * n_quirofanos) * min_ocupacion), "RVACACIONES2_" + str(h+1))
# RVACACIONES3: Impedimento de las vacaciones en caso de realizar una formación o disfrutar un permiso
for c in range(C):
    for h in range(H):
        Modelo += (V_ch[c][h] <= 1 - formacion_ch[c][h], "RVACACIONES3.1_" + str(c+1) + "_" + str(h+1))
        Modelo += (V_ch[c][h] <= 1 - matrimonio_ch[c][h], "RVACACIONES3.2_" + str(c+1) + "_" + str(h+1))

# FUNCIÓN OBJETIVO:
if (modelo == 0):
    Modelo.objective = (
        # MAXIMIZAR EL NÚMERO DE PACIENTES ASIGNADOS
        + 100/3 * xsum(X1_ich[i][c][h] for i in range(I) for c in range(C) for h in range(H))/(total_demanda_1 + total_LE1_inicial)
        + 100/3 * xsum(X2_ich[i][c][h] for i in range(I) for c in range(C) for h in range(H))/(total_demanda_2 + total_LE2_inicial)
        + 100/3 * xsum(X3_ich[i][c][h] for i in range(I) for c in range(C) for h in range(H))/(total_demanda_3 + total_LE3_inicial)
        # MINIMIZAR LOS ATRASOS DE LOS PACIENTES QUE ESTABAN EN LAS LISTAS DE ESPERA
        - 25/6 * xsum((X1_ichph[i][c][0][h] * (h - (r_1i[i] - TEM1_i[i]))) for i in range(I) for c in range(C) for h in range(H) if (h >
(r_1i[i] - TEM1_i[i]))/(maximos_pacientes_atrasados_LE1 * maximo_atraso_LE1)
        - 25/6 * xsum((X2_ichph[i][c][hp][h] * (h - (r_2i[i] - TEM2_i[i]))) for i in range(I) for c in range(C) for hp in range(e_12i[i])
for h in range(H) if (h > (r_2i[i] - TEM2_i[i]))/(maximos_pacientes_atrasados_LE2 * maximo_atraso_LE2)
        - 25/6 * xsum((X3_ichph[i][c][hp][h] * (h - (r_3i[i] - TEM3_i[i]))) for i in range(I) for c in range(C) for hp in range(e_23i[i])
for h in range(H) if (h > (r_3i[i] - TEM3_i[i]))/(maximos_pacientes_atrasados_LE3 * maximo_atraso_LE3)
        # MINIMIZAR LOS PACIENTES NO ASIGNADOS QUE LLEGA DE LAS LISTAS DE ESPERA
        - 25/6 * xsum((LE1_inicial[i] - xsum(X1_ichph[i][c][0][h] for c in range(C) for h in range(H))) for i in range(I))/total_LE1
        - 25/6 * xsum((LE2_inicial[i][c][hp] - xsum(X2_ichph[i][c][hp][h] for h in range(hp,H))) for i in range(I) for c in range
(C) for hp in range(e_12i[i]))/total_LE2
        - 25/6 * xsum((LE3_inicial[i][c][hp] - xsum(X3_ichph[i][c][hp][h] for h in range(hp,H))) for i in range(I) for c in range
(C) for hp in range(e_23i[i]))/total_LE3
        # MINIMIZAR LOS ATRASOS DE LOS PACIENTES QUE VAN LLEGANDO
        - 25/6 * xsum((X1_ichph[i][c][hp][h] * (h - (hp + r_1i[i]))) for i in range(I) for c in range(C) for hp in range(1, H) for h in
range(H) if (h > (hp + r_1i[i]))/(maximos_pacientes_atrasados_1 * maximo_atraso_1)
        - 25/6 * xsum((X2_ichph[i][c][hp][h] * (h - (hp + e_12i[i] + r_2i[i]))) for i in range(I) for c in range(C) for hp in
range(e_12i[i], H) for h in range(H) if (h > (hp + e_12i[i] + r_2i[i]))/(maximos_pacientes_atrasados_2 * maximo_atraso_2)
        - 25/6 * xsum((X3_ichph[i][c][hp][h] * (h - (hp + e_23i[i] + r_3i[i]))) for i in range(I) for c in range(C) for hp in
range(e_23i[i], H) for h in range(H) if (h > (hp + e_23i[i] + r_3i[i]))/(maximos_pacientes_atrasados_3 * maximo_atraso_3)
        # MINIMIZAR LOS PACIENTES NO ASIGNADOS QUE LLEGA DE LAS DEMANDAS
        - 25/6 * xsum(((d_ih[i][hp] - xsum(X1_ichph[i][c][hp][h] for c in range(C) for h in range(hp,H)))*(H - hp)) for i in range
(I) for hp in range(1,H))/(total_demanda_1 * H)
        - 25/6 * xsum(((X1_ich[i][c][hp] - e_12i[i]) - xsum(X2_ichph[i][c][hp][h] for h in range(hp,H)))*(H - hp)) for i in range(I)
for c in range(C) for hp in range(e_12i[i],H))/(total_demanda_2 + total_LE1_inicial) * H)
        - 25/6 * xsum(((X2_ich[i][c][hp] - e_23i[i]) - xsum(X3_ichph[i][c][hp][h] for h in range(hp,H)))*(H - hp)) for i in range(I)
for c in range(C) for hp in range(e_23i[i],H))/(total_demanda_3 + total_LE2_inicial) * H)
    )
if (modelo == 1):
    Modelo.objective = (
        # MAXIMIZAR EL NÚMERO DE PACIENTES ASIGNADOS
        + 95/3 * xsum(X1_ich[i][c][h] for i in range(I) for c in range(C) for h in range(H))/(total_demanda_1 + total_LE1_inicial)
        + 95/3 * xsum(X2_ich[i][c][h] for i in range(I) for c in range(C) for h in range(H))/(total_demanda_2 + total_LE2_inicial)
        + 95/3 * xsum(X3_ich[i][c][h] for i in range(I) for c in range(C) for h in range(H))/(total_demanda_3 + total_LE3_inicial)
        # MINIMIZAR LOS ATRASOS DE LOS PACIENTES QUE ESTABAN EN LAS LISTAS DE ESPERA
        - 25/6 * xsum((X1_ichph[i][c][0][h] * (h - (r_1i[i] - TEM1_i[i]))) for i in range(I) for c in range(C) for h in range(H) if (h >
(r_1i[i] - TEM1_i[i]))/(maximos_pacientes_atrasados_LE1 * maximo_atraso_LE1)
        - 25/6 * xsum((X2_ichph[i][c][hp][h] * (h - (r_2i[i] - TEM2_i[i]))) for i in range(I) for c in range(C) for hp in range(e_12i[i])
for h in range(H) if (h > (r_2i[i] - TEM2_i[i]))/(maximos_pacientes_atrasados_LE2 * maximo_atraso_LE2)
        - 25/6 * xsum((X3_ichph[i][c][hp][h] * (h - (r_3i[i] - TEM3_i[i]))) for i in range(I) for c in range(C) for hp in range(e_23i[i])
for h in range(H) if (h > (r_3i[i] - TEM3_i[i]))/(maximos_pacientes_atrasados_LE3 * maximo_atraso_LE3)
        # MINIMIZAR LOS PACIENTES NO ASIGNADOS QUE LLEGA DE LAS LISTAS DE ESPERA
        - 25/6 * xsum((LE1_inicial[i] - xsum(X1_ichph[i][c][0][h] for c in range(C) for h in range(H))) for i in range(I))/total_LE1
        - 25/6 * xsum((LE2_inicial[i][c][hp] - xsum(X2_ichph[i][c][hp][h] for h in range(hp,H))) for i in range(I) for c in range
(C) for hp in range(e_12i[i]))/total_LE2
        - 25/6 * xsum((LE3_inicial[i][c][hp] - xsum(X3_ichph[i][c][hp][h] for h in range(hp,H))) for i in range(I) for c in range
(C) for hp in range(e_23i[i]))/total_LE3
        # MINIMIZAR LOS ATRASOS DE LOS PACIENTES QUE VAN LLEGANDO
        - 25/6 * xsum((X1_ichph[i][c][hp][h] * (h - (hp + r_1i[i]))) for i in range(I) for c in range(C) for hp in range(1, H) for h in
range(H) if (h > (hp + r_1i[i]))/(maximos_pacientes_atrasados_1 * maximo_atraso_1)
        - 25/6 * xsum((X2_ichph[i][c][hp][h] * (h - (hp + e_12i[i] + r_2i[i]))) for i in range(I) for c in range(C) for hp in
range(1, H) for h in range(H) if (h > (hp + e_12i[i] + r_2i[i]))/(maximos_pacientes_atrasados_2 * maximo_atraso_2)
        - 25/6 * xsum((X3_ichph[i][c][hp][h] * (h - (hp + e_23i[i] + r_3i[i]))) for i in range(I) for c in range(C) for hp in
range(1, H) for h in range(H) if (h > (hp + e_23i[i] + r_3i[i]))/(maximos_pacientes_atrasados_3 * maximo_atraso_3)
    )

```

```

range(e_12i[i], H) for h in range(H) if (h > (hp + e_12i[i] + r_2i[i]))/(maximos_pacientes_atrasados_2 * maximo_atraso_2)
- 25/6 * xsum((X3_ichph[i][c][hp][h] * (h - (hp + e_23i[i] + r_3i[i]))) for i in range(I) for c in range(C) for hp in
range(e_23i[i], H) for h in range(H) if (h > (hp + e_23i[i] + r_3i[i]))/(maximos_pacientes_atrasados_3 * maximo_atraso_3)
# MINIMIZAR LOS PACIENTES NO ASIGNADOS QUE LLEGA DE LAS DEMANDAS
- 25/6 * xsum(((d_ih[i][hp] - xsum(X1_ichph[i][c][hp][h] for c in range (C) for h in range (hp,H)))*(H- hp)) for i in range
(I) for hp in range (1,H))/(total_demanda_1 * H)
- 25/6 * xsum(((X1_ich[i][c][hp] - e_12i[i]) - xsum(X2_ichph[i][c][hp][h] for h in range (hp,H)))*(H- hp)) for i in range (I)
for c in range (C) for hp in range (e_12i[i],H))/(total_demanda_2 + total_LE1_inicial * H)
- 25/6 * xsum(((X2_ich[i][c][hp] - e_23i[i]) - xsum(X3_ichph[i][c][hp][h] for h in range (hp,H)))*(H- hp)) for i in range (I)
for c in range (C) for hp in range (e_23i[i],H))/(total_demanda_3 + total_LE2_inicial * H)
# MAXIMIZAR EL GRADO DE SATISFACION DE LOS CIRUJANOS
+ 5 * xsum(V_ch[c][h] * prioridad_vacaciones_ch[c][h] for c in range (C) for h in range (H))/(maxima_prioridad)
)

# ESCRITURA DEL MODELO
Modelo.write("Modelo_AH-MQ_modelo_{modelo}_escenario_{escenario}_caso_{caso}_semilla_{semilla}.lp")

# OPTIMIZACIÓN
Modelo.optimize(max_seconds = 7200)

print(Modelo.status)

print(Modelo.gap)

fin = time.time()
print("Tiempo de ejecución del caso:", caso, "-", (fin - inicio)/60, "minutos")
if (Modelo.status == OptimizationStatus.NO_SOLUTION_FOUND):
    frequency = 500 # Frecuencia en Hz
    duration = 300 # Duración en milisegundos
    winsound.Beep(frequency, duration)
    continue
if (Modelo.status == OptimizationStatus.INFEASIBLE):
    print(formacion_ch)
    print(matrimonio_ch)
    frequency = 500 # Frecuencia en Hz
    duration = 300 # Duración en milisegundos
    winsound.Beep(frequency, duration)
    continue

total_prequirurgica = 0
total_quirurgica = 0
total_postquirurgica = 0

tiempo_medio_E1 = 0
tiempo_medio_E2 = 0
tiempo_medio_E3 = 0
for i in range (I):
    for c in range (C):
        for h in range (H):

            if (X1_ich[i][c][h].x > 0):
                total_prequirurgica = total_prequirurgica + X1_ich[i][c][h].x
                tiempo_medio_E1 = tiempo_medio_E1 + X1_ich[i][c][h].x * t_1i[i]

            if (X2_ich[i][c][h].x > 0):
                total_quirurgica = total_quirurgica + X2_ich[i][c][h].x
                tiempo_medio_E2 = tiempo_medio_E2 + X2_ich[i][c][h].x * t_2i[i]

            if (X3_ich[i][c][h].x > 0):
                total_postquirurgica = total_postquirurgica + X3_ich[i][c][h].x
                tiempo_medio_E3 = tiempo_medio_E3 + X3_ich[i][c][h].x * t_3i[i]

if (total_prequirurgica > 0):
    tiempo_medio_E1 = tiempo_medio_E1/total_prequirurgica
else:
    tiempo_medio_E1 = 0
if (total_quirurgica > 0):
    tiempo_medio_E2 = tiempo_medio_E2/total_quirurgica

```

```

else:
    tiempo_medio_E2 = 0
if(total_postquirurgica > 0):
    tiempo_medio_E3 = tiempo_medio_E3/total_postquirurgica
else:
    tiempo_medio_E3 = 0

atraso_prequirurgico = 0
atraso_quirurgico = 0
atraso_postquirurgico = 0
atraso_medio_prequirurgico = 0
atraso_medio_quirurgico = 0
atraso_medio_postquirurgico = 0

for i in range (I):
    for c in range (C):
        for h in range (H):
            if ((X1_ichph[i][c][0][h].x > 0) and (h > (r_1[i] - TEM1_i[i]))):
                atraso_prequirurgico = atraso_prequirurgico + X1_ichph[i][c][0][h].x
                atraso_medio_prequirurgico = atraso_medio_prequirurgico + (h - (r_1[i] - TEM1_i[i])) * X1_ichph[i][c][0][h].x
            if ((X2_ichph[i][c][0][h].x > 0) and (h > (r_2[i] - TEM2_i[i]))):
                atraso_quirurgico = atraso_quirurgico + X2_ichph[i][c][0][h].x
                atraso_medio_quirurgico = atraso_medio_quirurgico + (h - (r_2[i] - TEM2_i[i])) * X2_ichph[i][c][0][h].x
            if ((X3_ichph[i][c][0][h].x > 0) and (h > (r_3[i] - TEM3_i[i]))):
                atraso_postquirurgico = atraso_postquirurgico + X3_ichph[i][c][0][h].x
                atraso_medio_postquirurgico = atraso_medio_postquirurgico + (h - (r_3[i] - TEM3_i[i])) * X3_ichph[i][c][0][h].x

for i in range (I):
    for c in range (C):
        for hp in range (1,H):
            for h in range (H):
                if ((X1_ichph[i][c][hp][h].x > 0) and (h > (hp + r_1[i]))):
                    atraso_prequirurgico = atraso_prequirurgico + X1_ichph[i][c][hp][h].x
                    atraso_medio_prequirurgico = atraso_medio_prequirurgico + (h - (hp + r_1[i])) * X1_ichph[i][c][hp][h].x
                if ((X2_ichph[i][c][hp][h].x > 0) and (h > (hp + e_12[i] + r_2[i]))):
                    atraso_quirurgico = atraso_quirurgico + X2_ichph[i][c][hp][h].x
                    atraso_medio_quirurgico = atraso_medio_quirurgico + (h - (hp + e_12[i] + r_2[i])) * X2_ichph[i][c][hp][h].x
                if ((X3_ichph[i][c][hp][h].x > 0) and (h > (hp + e_23[i] + r_3[i]))):
                    atraso_postquirurgico = atraso_postquirurgico + X3_ichph[i][c][hp][h].x
                    atraso_medio_postquirurgico = atraso_medio_postquirurgico + (h - (hp + e_23[i] + r_3[i])) *
X3_ichph[i][c][hp][h].x

if (atraso_prequirurgico > 0):
    atraso_medio_prequirurgico = atraso_medio_prequirurgico/atraso_prequirurgico
else:
    atraso_medio_prequirurgico = 0
if (atraso_quirurgico > 0):
    atraso_medio_quirurgico = atraso_medio_quirurgico/atraso_quirurgico
else:
    atraso_medio_quirurgico = 0
if (atraso_postquirurgico > 0):
    atraso_medio_postquirurgico = atraso_medio_postquirurgico/atraso_postquirurgico
else:
    atraso_medio_postquirurgico = 0

tiempo_usado_consulta = xsum((X1_ich[i][c][h] * t_1[i] + X3_ich[i][c][h] * t_3[i]) for i in range (I) for c in range (C) for h in
range (H))
tiempo_usado_quirofano = xsum((X2_ich[i][c][h]*t_2[i]) for i in range (I) for c in range (C) for h in range (H))

disponibilidad_consulta = 0
disponibilidad_quirofano = 0

for h in range (H):
    disponibilidad_consulta = disponibilidad_consulta + a_jh[0][h]
    disponibilidad_quirofano = disponibilidad_quirofano + a_jh[1][h]

tiempo_usado_cirujano_consulta = xsum((X1_ich[i][c][h] * t_1[i] + X3_ich[i][c][h] * t_3[i]) for i in range (I) for c in range
(C) for h in range (H))

```

tiempo_usado_cirujano_quirofano = xsum((X2_ich[i][c][h] * t_2i[i] + X2p_ich[i][c][h] * t_2i[i]) for i in range (I) for c in range (C) for h in range (H))

disponibilidad_cirujano_consulta = xsum(N_jch[0][c][h].x * min_turno for c in range (C) for h in range (H))
disponibilidad_cirujano_quirofano = xsum(N_jch[1][c][h].x * min_turno for c in range (C) for h in range (H))

```
if (modelo == 1):
    grado_satisfaccion = 0
    for c in range (C):
        for h in range (H):
            grado_satisfaccion = grado_satisfaccion + V_ch[c][h].x * prioridad_vacaciones_ch[c][h]
        grado_satisfaccion = grado_satisfaccion/maxima_prioridad
```

pacientes_LE1_inicial = 0

```
for i in range (I):
    pacientes_LE1_inicial = pacientes_LE1_inicial + LE1_inicial[i]
```

pacientes_LE2_inicial = 0

```
for i in range (I):
    for c in range (C):
        for h in range (e_12i[i]):
            pacientes_LE2_inicial = pacientes_LE2_inicial + LE2_inicial[i][c][h]
```

pacientes_LE3_inicial = 0

```
for i in range (I):
    for c in range (C):
        for h in range (e_23i[i]):
            pacientes_LE3_inicial = pacientes_LE3_inicial + LE3_inicial[i][c][h]
```

atendidos_LE1_inicial = 0
atendidos_LE2_inicial = 0
atendidos_LE3_inicial = 0

```
for i in range (I):
    for c in range (C):
        for h in range (H):
            atendidos_LE1_inicial = atendidos_LE1_inicial + X1_ichph[i][c][0][h].x
            for hp in range (e_12i[i]):
                atendidos_LE2_inicial = atendidos_LE2_inicial + X2_ichph[i][c][hp][h].x
            for hp in range (e_23i[i]):
                atendidos_LE3_inicial = atendidos_LE3_inicial + X3_ichph[i][c][hp][h].x
```

pacientes_sin_asignar_1 = 0
atraso_experimentado_1 = 0

E1 = [0 for i in range (I)]
for i in range (I):
 E1[i] = [0 for h in range (H)]

```
for i in range (I):
    for hp in range (H):
        for c in range (C):
            for h in range (hp,H):
                E1[i][hp] = E1[i][hp] + X1_ichph[i][c][hp][h].x
```

```
for i in range (I):
    pacientes_sin_asignar_1 = pacientes_sin_asignar_1 + (LE1_inicial[i] - E1[i][0])
    if (LE1_inicial[i] - E1[i][0] > 0):
        atraso_experimentado_1 = atraso_experimentado_1 + (H - 0) * (LE1_inicial[i] - E1[i][0])
    for hp in range (1,H):
        pacientes_sin_asignar_1 = pacientes_sin_asignar_1 + (d_ih[i][hp] - E1[i][hp])
        if (d_ih[i][hp] - E1[i][hp] > 0):
            atraso_experimentado_1 = atraso_experimentado_1 + (H - hp) * (d_ih[i][hp] - E1[i][hp])
```

pacientes_sin_asignar_2 = 0

```

atraso_experimentado_2 = 0

E2 = [0 for i in range (I)]
for i in range (I):
    E2[i] = [0 for c in range (C)]
    for c in range (C):
        E2[i][c] = [0 for h in range (H)]

for i in range (I):
    for hp in range (H):
        for c in range (C):
            for h in range (hp,H):
                E2[i][c][hp] = E2[i][c][hp] + X2_ichph[i][c][hp][h].x

for i in range (I):
    for c in range (C):
        for hp in range (e_12i[i]):
            pacientes_sin_asignar_2 = pacientes_sin_asignar_2 + (LE2_inicial[i][c][hp] - E2[i][c][hp])
            if (LE2_inicial[i][c][hp] - E2[i][c][hp] > 0):
                atraso_experimentado_2 = atraso_experimentado_2 + (H - hp) * (LE2_inicial[i][c][hp] - E2[i][c][hp])

        for hp in range (e_12i[i],H):
            pacientes_sin_asignar_2 = pacientes_sin_asignar_2 + (X1_ich[i][c][hp - e_12i[i]].x - E2[i][c][hp])
            if (X1_ich[i][c][hp - e_12i[i]].x - E2[i][c][hp] > 0):
                atraso_experimentado_2 = atraso_experimentado_2 + (H - hp) * (X1_ich[i][c][hp - e_12i[i]].x - E2[i][c][hp])

pacientes_sin_asignar_3 = 0
atraso_experimentado_3 = 0

E3 = [0 for i in range (I)]
for i in range (I):
    E3[i] = [0 for c in range (C)]
    for c in range (C):
        E3[i][c] = [0 for h in range (H)]

for i in range (I):
    for hp in range (H):
        for c in range (C):
            for h in range (hp,H):
                E3[i][c][hp] = E3[i][c][hp] + X3_ichph[i][c][hp][h].x

for i in range (I):
    for c in range (C):
        for hp in range (e_23i[i]):
            pacientes_sin_asignar_3 = pacientes_sin_asignar_3 + (LE3_inicial[i][c][hp] - E3[i][c][hp])
            if (LE3_inicial[i][c][hp] - E3[i][c][hp] > 0):
                atraso_experimentado_3 = atraso_experimentado_3 + (H - hp) * (LE3_inicial[i][c][hp] - E3[i][c][hp])

        for hp in range (e_23i[i],H):
            pacientes_sin_asignar_3 = pacientes_sin_asignar_3 + (X2_ich[i][c][hp - e_23i[i]].x - E3[i][c][hp])
            if (X2_ich[i][c][hp - e_23i[i]].x - E3[i][c][hp] > 0):
                atraso_experimentado_3 = atraso_experimentado_3 + (H - hp) * (X2_ich[i][c][hp - e_23i[i]].x - E3[i][c][hp])

if (pacientes_sin_asignar_1 > 0):
    atraso_experimentado_1 = atraso_experimentado_1/pacientes_sin_asignar_1
else:
    atraso_experimentado_1 = 0
if (pacientes_sin_asignar_2 > 0):
    atraso_experimentado_2 = atraso_experimentado_2/pacientes_sin_asignar_2
else:
    atraso_experimentado_2 = 0
if (pacientes_sin_asignar_3 > 0):
    atraso_experimentado_3 = atraso_experimentado_3/pacientes_sin_asignar_3
else:
    atraso_experimentado_3 = 0

# Demanda total
demanda_total = 0

```

```

for i in range (I):
    for h in range (H):
        demanda_total = demanda_total + d_ih[i][h]

total_prequirurgica_real_pot = 0
for i in range (I):
    total_prequirurgica_real_pot = total_prequirurgica_real_pot + LE1_inicial[i]

for i in range (I):
    for h in range (H):
        total_prequirurgica_real_pot = total_prequirurgica_real_pot + d_ih[i][h]

total_quirurgica_real_pot = 0
for i in range (I):
    for c in range (C):
        for h in range (e_12i[i]):
            total_quirurgica_real_pot = total_quirurgica_real_pot + LE2_inicial[i][c][h]

for i in range (I):
    for c in range (C):
        for h in range (e_12i[i],H):
            total_quirurgica_real_pot = total_quirurgica_real_pot + X1_ich[i][c][h - e_12i[i]].x

total_postquirurgica_real_pot = 0
for i in range (I):
    for c in range (C):
        for h in range (e_23i[i]):
            total_postquirurgica_real_pot = total_postquirurgica_real_pot + LE3_inicial[i][c][h]

for i in range (I):
    for c in range (C):
        for h in range (e_23i[i],H):
            total_postquirurgica_real_pot = total_postquirurgica_real_pot + X2_ich[i][c][h - e_23i[i]].x

# ESCRITURA DE LOS RESULTADOS EN EXCEL

book = Workbook()

border_style = Border(left=Side(style='thin'), right=Side(style='thin'), top=Side(style='thin'), bottom=Side(style='thin'))
border_thick = Border(left=Side(style='thick'), right=Side(style='thick'), top=Side(style='thick'), bottom=Side(style='thick'))

sheet = book.active
sheet.title = "RESUMEN"

sheet.sheet_view.zoomScale = 80

for col in ["A", "B", "E", "F", "G", "M"]:
    sheet.column_dimensions[col].width = 2
for col in ["I", "J", "K", "L"]:
    sheet.column_dimensions[col].width = 25
sheet.column_dimensions["C"].width = 55
sheet.column_dimensions["D"].width = 8
sheet.column_dimensions["H"].width = 35
sheet.merge_cells('H3:L3')
sheet["H3"] = "INDICADORES DE INTERÉS"
sheet["H3"].font = Font(bold = True)
sheet["H3"].font = Font(size = 22)
sheet["C3"] = "SEMILLA:"
sheet["C4"] = "CASO:"
sheet["C6"] = "Grado de cobertura de los recursos:"
sheet["C7"] = "Nivel de demanda:"
sheet["C9"] = "Número de consultas:"
sheet["C10"] = "Número de quirófanos:"
sheet["C12"] = "Número de tipos de intervenciones:"
sheet["C13"] = "Número de cirujanos:"
sheet["C14"] = "Número de semanas del horizonte temporal:"
sheet["C16"] = "Demanda total:"
sheet["C20"] = "Porcentaje de uso de las consultas:"

```

```

sheet["C21"] = "Porcentaje de uso de los quirófanos:"
sheet["C23"] = "Proporción del tiempo dedicado a consultas por los cirujanos:"
sheet["C24"] = "Proporción del tiempo dedicado a quirófano por los cirujanos:"
sheet["C26"] = "Tiempo medio de la etapa prequirúrgica (min):"
sheet["C27"] = "Tiempo medio de la etapa quirúrgica (min):"
sheet["C28"] = "Tiempo medio de la etapa postquirúrgica (min):"
sheet["C30"] = "Tiempo de ejecución (min):"
sheet["D3"] = semilla
sheet["D4"] = caso
sheet["D6"] = alpha
sheet["D7"] = beta
sheet["D9"] = n_consultas
sheet["D10"] = n_quirofanos
sheet["D12"] = I
sheet["D13"] = C
sheet["D14"] = H
sheet["D16"] = demanda_total
sheet["D20"] = str(round((tiempo_usado_consulta.x/disponibilidad_consulta)*100,2)) + " %"
sheet["D21"] = str(round((tiempo_usado_quirofano.x/disponibilidad_quirofano)*100,2)) + " %"
sheet["D23"] = str(round((tiempo_usado_cirujano_consulta.x/disponibilidad_cirujano_consulta.x)*100,2)) + " %"
sheet["D24"] = str(round((tiempo_usado_cirujano_quirofano.x/disponibilidad_cirujano_quirofano.x)*100,2)) + " %"
sheet["D26"] = round(tiempo_medio_E1,2)
sheet["D27"] = round(tiempo_medio_E2,2)
sheet["D28"] = round(tiempo_medio_E3,2)
sheet["D30"] = (fin - inicio)/60
sheet["H5"] = "PLANIFICACIÓN"
sheet["H6"] = "Etapa prequirúrgica"
sheet["H7"] = "Etapa quirúrgica"
sheet["H8"] = "Etapa postquirúrgica"
sheet["H9"] = "TOTAL"
sheet["H11"] = "LISTAS DE ESPERA INICIALES"
sheet["H12"] = "Etapa prequirúrgica"
sheet["H13"] = "Etapa quirúrgica"
sheet["H14"] = "Etapa postquirúrgica"
sheet["H15"] = "TOTAL"
sheet["H17"] = "ATRASO"
sheet["H18"] = "Etapa prequirúrgica"
sheet["H19"] = "Etapa quirúrgica"
sheet["H20"] = "Etapa postquirúrgica"
sheet["H21"] = "TOTAL"
sheet["H23"] = "Número de variables:"
sheet["H24"] = "Número de restricciones:"
sheet["H26"] = "Grado de satisfacción de los cirujanos:"
sheet["H28"] = "Estatus de la función objetivo:"
sheet["H29"] = "GAP:"
sheet["H30"] = "Valor de la función objetivo:"
sheet["I5"] = "Pac. ideal. atendibles"
sheet["I6"] = total_demanda_1 + total_LE1_inicial
sheet["I7"] = total_demanda_2 + total_LE2_inicial
sheet["I8"] = total_demanda_3 + total_LE3_inicial
sheet["I9"] = total_demanda_1 + total_LE1_inicial + total_demanda_2 + total_LE2_inicial + total_demanda_3 +
total_LE3_inicial
sheet["I11"] = "Pacientes totales"
sheet["I12"] = pacientes_LE1_inicial
sheet["I13"] = pacientes_LE2_inicial
sheet["I14"] = pacientes_LE3_inicial
sheet["I15"] = pacientes_LE1_inicial + pacientes_LE2_inicial + pacientes_LE3_inicial
sheet["I17"] = "Pac. atendidos con atraso"
sheet["I18"] = atraso_prequirurgico
sheet["I19"] = atraso_quirurgico
sheet["I20"] = atraso_postquirurgico
sheet["I21"] = atraso_prequirurgico + atraso_quirurgico + atraso_postquirurgico
sheet["I23"] = Modelo.num_cols
sheet["I24"] = Modelo.num_rows
if(modelo == 1):
    sheet["I26"] = str(round(grado_satisfaccion*100,2)) + " %"
else:
    sheet["I26"] = "-"

```

```

sheet["I28"] = str(Modelo.status)
sheet["I29"] = str(Modelo.gap)
sheet["I30"] = str(round(Modelo.objective_value,3))
sheet["J5"] = "Pac. real. atendibles"
sheet["J6"] = total_prequirurgica_real_pot
sheet["J7"] = total_quirurgica_real_pot
sheet["J8"] = total_postquirurgica_real_pot
sheet["J9"] = total_prequirurgica_real_pot + total_quirurgica_real_pot + total_postquirurgica_real_pot
sheet["J11"] = "Pacientes atendidos"
sheet["J12"] = atendidos_LE1_inicial
sheet["J13"] = atendidos_LE2_inicial
sheet["J14"] = atendidos_LE3_inicial
sheet["J15"] = atendidos_LE1_inicial + atendidos_LE2_inicial + atendidos_LE3_inicial
sheet["J17"] = "Atraso medio (sem)"
sheet["J18"] = str(round(atraso_medio_prequirurgico,2))
sheet["J19"] = str(round(atraso_medio_quirurgico,2))
sheet["J20"] = str(round(atraso_medio_postquirurgico,2))
sheet["J21"] = str(round((atraso_medio_prequirurgico + atraso_medio_quirurgico + atraso_medio_postquirurgico)/3,2))
sheet["K5"] = "Pacientes atendidos"
sheet["K6"] = total_prequirurgica
sheet["K7"] = total_quirurgica
sheet["K8"] = total_postquirurgica
sheet["K9"] = total_prequirurgica + total_quirurgica + total_postquirurgica
sheet["K11"] = "Pacientes sin atender"
sheet["K12"] = pacientes_LE1_inicial - atendidos_LE1_inicial
sheet["K13"] = pacientes_LE2_inicial - atendidos_LE2_inicial
sheet["K14"] = pacientes_LE3_inicial - atendidos_LE3_inicial
sheet["K15"] = pacientes_LE1_inicial - atendidos_LE1_inicial + pacientes_LE2_inicial - atendidos_LE2_inicial +
pacientes_LE3_inicial - atendidos_LE3_inicial
sheet["K17"] = "Pac. sin atender con atraso"
sheet["K18"] = pacientes_sin_asignar_1
sheet["K19"] = pacientes_sin_asignar_2
sheet["K20"] = pacientes_sin_asignar_3
sheet["K21"] = pacientes_sin_asignar_1 + pacientes_sin_asignar_2 + pacientes_sin_asignar_3
sheet["L5"] = "Pacientes sin atender"
sheet["L6"] = total_prequirurgica_real_pot - total_prequirurgica
sheet["L7"] = total_quirurgica_real_pot - total_quirurgica
sheet["L8"] = total_postquirurgica_real_pot - total_postquirurgica
sheet["L9"] = (total_prequirurgica_real_pot - total_prequirurgica) + (total_quirurgica_real_pot - total_quirurgica) +
(total_postquirurgica_real_pot - total_postquirurgica)
sheet["L17"] = "Atraso medio (sem)"
sheet["L18"] = str(round(atraso_experimentaldo_1,2))
sheet["L19"] = str(round(atraso_experimentaldo_2,2))
sheet["L20"] = str(round(atraso_experimentaldo_3,2))
sheet["L21"] = str(round((atraso_experimentaldo_1 + atraso_experimentaldo_2 + atraso_experimentaldo_3)/3,2))

```

```

for k in range (1,31):

```

```

    sheet.cell(row = k, column = 3).alignment = Alignment(horizontal = 'right', vertical = 'center')
    sheet.cell(row = k, column = 3).font = Font(bold = True)
    sheet.cell(row = k, column = 4).alignment = Alignment(horizontal = 'left', vertical = 'center')
    sheet.cell(row = k, column = 4).font = Font(bold = True)
    sheet.cell(row = k, column = 8).alignment = Alignment(horizontal = 'center', vertical = 'center')
    sheet.cell(row = k, column = 9).alignment = Alignment(horizontal = 'center', vertical = 'center')
    sheet.cell(row = k, column = 10).alignment = Alignment(horizontal = 'center', vertical = 'center')
    sheet.cell(row = k, column = 11).alignment = Alignment(horizontal = 'center', vertical = 'center')
    sheet.cell(row = k, column = 12).alignment = Alignment(horizontal = 'center', vertical = 'center')

```

```

for k1 in range (9,13):

```

```

    for k2 in range (6,10):
        sheet.cell(row = k2, column = k1).font = Font(bold = True)
        if (k1 == 10):
            sheet.cell(row = k2, column = k1).font = Font(bold = True)
        if (k1 == 11):
            sheet.cell(row = k2, column = k1).font = Font(bold = True)

```

```

for k2 in range (12,16):

```

```

    sheet.cell(row = k2, column = k1).font = Font(bold = True)
    if (k1 == 10):

```

```

        sheet.cell(row = k2, column = k1).font = Font(bold = True)
    if (k1 == 11):
        sheet.cell(row = k2, column = k1).font = Font(bold = True)

    for k2 in range (18,22):
        sheet.cell(row = k2, column = k1).font = Font(bold = True)

for k1 in [2, 3, 4, 5]:
    for k2 in range (2, 18):
        sheet.cell(row=k2, column=k1).fill = PatternFill(start_color="FFFFFF", end_color="FFFFFF", fill_type="solid")
    for k2 in range (19, 32):
        sheet.cell(row=k2, column=k1).fill = PatternFill(start_color="FFFFFF", end_color="FFFFFF", fill_type="solid")

for k1 in [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]:
    for k2 in range (2, 32):
        sheet.cell(row=k2, column=k1).fill = PatternFill(start_color="FFFFFF", end_color="FFFFFF", fill_type="solid")

for k1 in range (8,12):
    for k2 in range (12,16):
        sheet.cell(row = k2, column = k1).border = border_style
        sheet.cell(row = k2, column = k1).fill = PatternFill(start_color="FFFFFF", end_color="FFFFFF", fill_type="solid")

for k1 in range (8,13):
    for k2 in range (5,10):
        sheet.cell(row = k2, column = k1).border = border_style
        sheet.cell(row = k2, column = k1).fill = PatternFill(start_color="FFFFFF", end_color="FFFFFF", fill_type="solid")
    for k2 in range (18,22):
        sheet.cell(row = k2, column = k1).border = border_style
        sheet.cell(row = k2, column = k1).fill = PatternFill(start_color="FFFFFF", end_color="FFFFFF", fill_type="solid")

for k in range (9, 12):
    sheet.cell(row = 5, column = k).border = border_style
    sheet.cell(row = 5, column = k).fill = PatternFill(start_color="FFFFFF", end_color="FFFFFF", fill_type="solid")
    sheet.cell(row = 11, column = k).border = border_style
    sheet.cell(row = 11, column = k).fill = PatternFill(start_color="FFFFFF", end_color="FFFFFF", fill_type="solid")

for k in range (9, 13):
    sheet.cell(row = 17, column = k).border = border_style
    sheet.cell(row = 17, column = k).fill = PatternFill(start_color="FFFFFF", end_color="FFFFFF", fill_type="solid")

sheet["I23"].alignment = Alignment(horizontal = 'left', vertical = 'center')
sheet["I24"].alignment = Alignment(horizontal = 'left', vertical = 'center')
sheet["I26"].alignment = Alignment(horizontal = 'left', vertical = 'center')
sheet["I28"].alignment = Alignment(horizontal = 'left', vertical = 'center')
sheet["I30"].alignment = Alignment(horizontal = 'left', vertical = 'center')
sheet["I23"].font = Font(bold = True)
sheet["I24"].font = Font(bold = True)
sheet["I26"].font = Font(bold = True)
sheet["I28"].font = Font(bold = True)
sheet["I30"].font = Font(bold = True)
sheet["H5"].font = Font(bold = True)
sheet["H11"].font = Font(bold = True)
sheet["H17"].font = Font(bold = True)
sheet["H23"].font = Font(bold = True)
sheet["H24"].font = Font(bold = True)
sheet["H26"].font = Font(bold = True)
sheet["H28"].font = Font(bold = True)
sheet["H30"].font = Font(bold = True)
sheet["H23"].alignment = Alignment(horizontal = 'right', vertical = 'center')
sheet["H24"].alignment = Alignment(horizontal = 'right', vertical = 'center')
sheet["H26"].alignment = Alignment(horizontal = 'right', vertical = 'center')
sheet["H28"].alignment = Alignment(horizontal = 'right', vertical = 'center')
sheet["H30"].alignment = Alignment(horizontal = 'right', vertical = 'center')

sheet1 = book.create_sheet('PLANIFICACIÓN')

sheet1.column_dimensions["A"].width = 4

```

```

sheet1.cell(row = 1, column = 2, value = "CIRUJANOS")
sheet1.cell(row = 1, column = 2).alignment = Alignment(horizontal = 'right', vertical = 'center')

for c in range (C):
    sheet1.cell(row = 1, column = c+3, value = c+1)
    sheet1.cell(row = 1, column = c+3).alignment = Alignment(horizontal = 'center', vertical = 'center')

for h in range (H * 16):
    for c in range (C + 1):
        sheet1.cell(row = h + 2, column = c + 2).border = border_style
        sheet1.cell(row = h + 2, column = c + 2).alignment = Alignment(horizontal = 'center', vertical = 'center')

k1 = 0
k2 = 0
k3 = 0
k4 = 0

for h in range (H):
    sheet1.merge_cells(f'{{get_column_letter(2)}}{{h+2+k3}}:{{get_column_letter(C+2)}}{{h+2+k3}}')
    sheet1.merge_cells(f'{{get_column_letter(2)}}{{h+6+k3}}:{{get_column_letter(C+2)}}{{h+6+k3}}')
    sheet1.merge_cells(f'{{get_column_letter(2)}}{{h+10+k3}}:{{get_column_letter(C+2)}}{{h+10+k3}}')
    sheet1.merge_cells(f'{{get_column_letter(2)}}{{h+14+k3}}:{{get_column_letter(C+2)}}{{h+14+k3}}')
    sheet1.cell(row = h+2+k3, column = 2, value = "E1")
    sheet1.cell(row = h+6+k3, column = 2, value = "E2 (PRIN)")
    sheet1.cell(row = h+10+k3, column = 2, value = "E2 (AUX)")
    sheet1.cell(row = h+14+k3, column = 2, value = "E3")
    sheet1.merge_cells(f'{{get_column_letter(1)}}{{h+2+k1+k2}}:{{get_column_letter(1)}}{{h+(4*(I+1))+1+k1+k2}}')
    sheet1.cell(row = h+2+k1+k2, column = 1, value = "SEMANA DE PLANIFICACIÓN:" + str(h+1))
    sheet1.cell(row = h+2+k1+k2, column = 1).alignment = Alignment(horizontal = 'center', vertical = 'center', textRotation = 90)

for etapa in range(4):
    for i in range (I):
        sheet1.cell(row = h+etapa+i+3+k1+k2, column = 2, value = "I: " + str(i))
    if (etapa == 0):
        for c in range (C):
            for i in range (I):
                if (modelo == 1):
                    if (V_ch[c][h].x == 1):
                        sheet1.cell(row = h+i+3+k3, column = c+3, value = "VACAS - " + str(prioridad_vacaciones_ch[c][h]))
                    elif (matrimonio_ch[c][h] == 1):
                        sheet1.cell(row = h+i+3+k3, column = c+3, value = "MATRI")
                    elif (formacion_ch[c][h] == 1):
                        sheet1.cell(row = h+i+3+k3, column = c+3, value = "FORM")
                    elif (X1_ich[i][c][h].x > 0):
                        sheet1.cell(row = h+i+3+k3, column = c+3, value = X1_ich[i][c][h].x)
                    else:
                        sheet1.cell(row = h+i+3+k3, column = c+3, value = "-")
                else:
                    if (X1_ich[i][c][h].x > 0):
                        sheet1.cell(row = h+i+3+k3, column = c+3, value = X1_ich[i][c][h].x)
                    else:
                        sheet1.cell(row = h+i+3+k3, column = c+3, value = "-")

    if (etapa == 1):
        for c in range (C):
            for i in range (I):
                if (modelo == 1):
                    if (V_ch[c][h].x == 1):
                        sheet1.cell(row = h+i+7+k3, column = c+3, value = "VACAS - " + str(prioridad_vacaciones_ch[c][h]))
                    elif (matrimonio_ch[c][h] == 1):
                        sheet1.cell(row = h+i+7+k3, column = c+3, value = "MATRI")
                    elif (formacion_ch[c][h] == 1):
                        sheet1.cell(row = h+i+7+k3, column = c+3, value = "FORM")
                    elif (X2_ich[i][c][h].x > 0):
                        sheet1.cell(row = h+i+7+k3, column = c+3, value = X2_ich[i][c][h].x)
                    else:
                        sheet1.cell(row = h+i+7+k3, column = c+3, value = "-")
                else:

```

```

if(X2_ich[i][c][h].x > 0):
    sheet1.cell(row = h+i+7+k3, column = c+3, value = X2_ich[i][c][h].x)
else:
    sheet1.cell(row = h+i+7+k3, column = c+3, value = "-")

if (etapa == 2):
    for c in range (C):
        for i in range (I):
            if (modelo == 1):
                if (V_ch[c][h].x == 1):
                    sheet1.cell(row = h+i+11+k3, column = c+3, value = "VACAS - " + str(prioridad_vacaciones_ch[c][h]))
                elif (matrimonio_ch[c][h] == 1):
                    sheet1.cell(row = h+i+11+k3, column = c+3, value = "MATRI")
                elif (formacion_ch[c][h] == 1):
                    sheet1.cell(row = h+i+11+k3, column = c+3, value = "FORM")
                elif(X2p_ich[i][c][h].x > 0):
                    sheet1.cell(row = h+i+11+k3, column = c+3, value = X2p_ich[i][c][h].x)
                else:
                    sheet1.cell(row = h+i+11+k3, column = c+3, value = "-")
            else:
                if(X2p_ich[i][c][h].x > 0):
                    sheet1.cell(row = h+i+11+k3, column = c+3, value = X2p_ich[i][c][h].x)
                else:
                    sheet1.cell(row = h+i+11+k3, column = c+3, value = "-")

if (etapa == 3):
    for c in range (C):
        for i in range (I):
            if (modelo == 1):
                if (V_ch[c][h].x == 1):
                    sheet1.cell(row = h+i+15+k3, column = c+3, value = "VACAS - " + str(prioridad_vacaciones_ch[c][h]))
                elif (matrimonio_ch[c][h] == 1):
                    sheet1.cell(row = h+i+15+k3, column = c+3, value = "MATRI")
                elif (formacion_ch[c][h] == 1):
                    sheet1.cell(row = h+i+15+k3, column = c+3, value = "FORM")
                elif(X3_ich[i][c][h].x > 0):
                    sheet1.cell(row = h+i+15+k3, column = c+3, value = X3_ich[i][c][h].x)
                else:
                    sheet1.cell(row = h+i+15+k3, column = c+3, value = "-")
            else:
                if(X3_ich[i][c][h].x > 0):
                    sheet1.cell(row = h+i+15+k3, column = c+3, value = X3_ich[i][c][h].x)
                else:
                    sheet1.cell(row = h+i+15+k3, column = c+3, value = "-")

    k1 = k1 + 3
    k2 = k2 + 3
    k3 = k3 + 15
    k4 = k4 + 6

book.save('res_caso_{caso}_semilla_{semilla}_escenario_{escenario}_modelo_{modelo}.xlsx")
frequency = 500 # Frecuencia en Hz
duration = 300 # Duración en milisegundos
winsound.Beep(frequency, duration)
fin_total = time.time()
if ((fin_total - inicio_total) < 120):
    print("\nTIEMPO DE EJECUCIÓN ENTRE TODOS LOS CASOS:", fin_total - inicio_total, "segundos")
if ((fin_total - inicio_total) >= 120):
    print("\nTIEMPO DE EJECUCIÓN ENTRE TODOS LOS CASOS:", (fin_total - inicio_total)/60, "minutos")
frequency = 500 # Frecuencia en Hz
duration = 1000 # Duración en milisegundos
winsound.Beep(frequency, duration)

```