

Trabajo Fin de Máster

Título: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA HERRAMIENTA DE MODELADO Y OPTIMIZACIÓN PARA AYUDAR A LA PLANIFICACIÓN DE COLECTAS DE UN CENTRO DE HEMODONACIÓN

Autor: EDUARDO FERNÁNDEZ GARCÍA

Tutor: D. JOSUÉ PAGÁN ORTIZ

Co-Tutor: D. JOSÉ LUIS RISCO MARTÍN

Departamento: DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Miembros del tribunal

Presidente: D.

Vocal: D.

Secretario: D.

Suplente: D.

Madrid, a 20 de junio de 2019

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN



TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Diseño e implementación de una
herramienta de modelado y
optimización para ayudar a la
planificación de colectas de un
centro de hemodonación**

EDUARDO FERNÁNDEZ GARCÍA

20 DE JUNIO DE 2019

Resumen del proyecto

Resumen

La sangre es un elemento esencial para pacientes con enfermedades oncológicas y en grandes operaciones quirúrgicas, y es un recurso que no puede ser obtenido de artificialmente, de modo que las campañas de donación de sangre son indispensables para garantizar el funcionamiento del sistema de hemodonación, obteniendo la cantidad extra de sangre necesaria mediante una correcta planificación de las colectas.

Este trabajo se ha realizado en colaboración con Centro Regional de Hemodonación de Murcia. En el centro, una persona es responsable de planificar y organizar todas las colectas, decidiendo de manera manual y en base a su criterio, dónde se acudirá cada día a extraer sangre. Además, es la responsable de tomar la decisión sobre cuántos recursos del centro se van a utilizar. Este hecho hace que en cada una de las planificaciones mensuales realizadas se asuma un error entre las donaciones previstas y las satisfechas que puede llegar hasta un 25 %. Además, esta planificación manual no cumple con la cantidad ideal determinada por el centro para mantener la cadena de suministro estable.

El objetivo de este trabajo es desarrollar una herramienta capaz de proponer una planificación para dichas campañas. Para ello utilizando datos históricos del centro de la Región de Murcia, y sumado a un conjunto de restricciones—como mantener una tasa de donantes jóvenes, aumentar la demanda en vísperas de festivos o introducir una tasa interanual de crecimiento—, la herramienta optimizará cada una de las colectas para obtener una cantidad objetivo de bolsas de sangre diarias. El resultado será un fichero de calendario (*.ics*) que mostrará, para cada día las distintas colectas a realizar. Este calendario incluye información, no solo relativa a la cantidad de bolsas de sangre a extraer, sino también otros parámetros como número de unidades móviles a utilizar, o el horario de la extracción.

La fase principal es el proceso de optimización, que se apoya en la herramienta IBM LOG CPLEX para resolver problemas de optimización. En la metodología propuesta, el modelo de optimización se integra en un *framework* de trabajo que recibe los datos, los procesa, y devuelve como resultado el mencionado calendario optimizado.

La herramienta consigue optimizar el objetivo con una precisión del 95,6 %

frente al 80,0 % de la planificación manual actual. Se ha realizado una comparativa entre la planificación real y la planificación de la herramienta, comprobando como la herramienta obtiene un promedio de 23 % de bolsas de sangre más al día. Se ha realizado un estudio de eficiencia de recursos utilizados, coste y distancia recorrida. Sin haber realizado una optimización multi-objetivo, la métrica de coste sólo es un 13 % más cara pese a que se cumple el objetivo con un 23 % más de éxito. Se consigue, además, prever un incremento interanual del 10 %.

Por último, al tratarse de una herramienta pionera en el campo de la planificación de colectas, se proponen líneas futuras para el desarrollo de la herramienta, para permitir el análisis de eficiencia de centros, reducción de costes y mejorar su rendimiento.

Abstract

Blood is an essential element for patients with oncological diseases and in large surgical operations, and it is a resource that can not be obtained artificially, so blood donation campaigns are essential to guarantee the functioning of the blood donation system, obtaining the extra amount of blood needed by correctly planning the collections.

This work has been carried out in collaboration with Centro Regional de Hemodonación de Murcia. In the center, a person is responsible for planning and organizing all collections, deciding manually and based on their criteria, where they will go every day to draw blood. In addition, this person is responsible for making the decision about how many resources of the center will be used. This fact means that in each of the monthly plans made, an error is assumed between the expected donations and those that can reach up to 25 %. In addition, this manual planning does not meet the ideal amount determined by the center to keep the supply chain stable.

The goal of this work is to develop a tool capable of proposing a planning for these campaigns. To do this using historical data from the center of the Region of Murcia, and added to a set of restrictions—such as maintaining a rate of young donors, increasing demand holidays or introducing an interannual growth rate—, the tool will optimize each of the collections to obtain an objective amount of blood bags daily. The result will be a calendar file (*.ics*) that will show, for each day, the different collections to be made. This calendar includes information, not only relative to the number of blood bags to be extracted, but also other parameters such as the number of mobile units to be used, or the extraction schedule.

The main phase is the optimization process, which is supported by the IBM LOG CPLEX tool to solve optimization problems. In the proposed methodology, the optimization model is integrated into a working *framework* that receives the data, processes it, and returns the aforementioned optimized calendar as a result.

The tool manages to optimize the objective with an accuracy of 95.6 % compared to 80.0 % of the current manual planning. A comparison has been made

between the actual planning and the planning of the tool, verifying how the tool obtains an average of 23 % of blood bags more per day. A study of the efficiency of resources used, cost and distance traveled has been carried out. Without having made a multi-objective optimization, the cost metric is only 13 % more expensive despite the fact that the objective is achieved with a 23 % more success. It is also possible to forecast an interannual increase of 10 %.

Finally, since it is a pioneering tool in the field of collection planning, future lines are proposed for the development of the tool, to allow the analysis of center efficiency, cost reduction and improve its performance.

Palabras clave

Optimización, donación, planificación, sangre, centro de hemodonación, colectas, CPLEX, restricciones, ics, calendario

Keywords

Optimization, donation, planning, blood, blood donation center, blood collection, CPLEX, constraints, ics, calendar

Agradecimientos

A mis padres, por la vida y las oportunidades que me han dado y por los que hoy soy quién soy.

Este trabajo se ha realizado gracias a la colaboración de los miembros del Centro Regional de Hemodonación de Murcia, en especial al esfuerzo de Jorge Pagán.

Lista de Acrónimos

CRH	Centro Regional de Hemodonación
CSV	Comma-Separated Values
ICS	Internet Calendaring and Scheduling
IDE	Integrated Development Environment
Fedsang	Federación Española de Donantes de Sangre
MILP	Mixed-Integer Linear Programming
MOEA	Multiobjective Evolutionary Algorithm
NP	Nondeterministic Polynomial Time
NSP	Nurse Scheduling Problem
OMS	Organización Mundial de la Salud
OPL	Optimization Programming Language
RTVE	Radio Televisión Española

Índice general

Resumen del proyecto	I
Agradecimientos	V
Lista de Acrónimos	IX
1. Introducción y objetivos	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	6
2. Estado del arte	7
2.1. Optimización de sistemas de distribución	7
2.2. Sistemas de hemodonación	9
3. Metodología	13
3.1. Marco general de optimización	15
3.2. Modelado de los datos	16
3.3. Optimización	17
3.3.1. Constantes	18
3.3.2. Variables	20
3.3.3. Restricciones	22
3.3.4. Función Objetivo	27
3.4. Postprocesado y representación de resultados	27
4. Herramientas e implementación	29
4.1. Herramientas	29

4.1.1. IBM ILOG CPLEX Optimization Studio	30
4.2. Preprocesado de los datos de entrada	32
4.3. Análisis de los datos de entrada	33
5. Resultados	37
5.1. Rendimiento de optimización	37
5.2. Resultados	39
5.2.1. Resultado de la optimización	39
5.2.2. Análisis de selección de puntos de extracción	43
5.2.3. Análisis de carga de trabajo de personal	44
5.2.4. Análisis de distancia recorrida	46
5.2.5. Análisis de costes	49
5.3. Calendario optimizado	51
6. Conclusiones y líneas de futuro	55
6.1. Conclusiones	55
6.2. Líneas de futuro	56
Bibliografía	61
I Anexos	63
Anexo: Restricciones	65
Primera iteración	65
Segunda iteración	67
II Anexos	71
Anexo: Aspectos éticos, económicos, sociales y medio ambientales	73
Anexo: Presupuesto económico	75
Presupuesto de ejecución material	75
Presupuesto de recursos materiales	75

ÍNDICE GENERAL

XIII

Costes de mano de obra	76
Coste total de los recursos	76
Gastos generales y beneficio industrial	76
Presupuesto total	77

Índice de figuras

1.1. Cantidad de donantes por cada mil habitantes en España	2
1.2. Personas previstas atender frente a las donaciones reales	3
1.3. Representación del sistema de hemodonación	4
1.4. Previsión de personas presentadas frente al error de estimación . . .	5
2.1. Fases de un punto de extracción en Estados Unidos	10
3.1. Marco general de funcionamiento de la herramienta	14
3.2. Comparación de la metodología anterior con la actual	14
3.3. Estructura de los datos de entrada	17
3.4. Diagrama de las distintas iteraciones del desarrollo de la herramienta	18
3.5. Estructura de la variable Unidad Móvil y α	21
3.6. Estructura de la variable β	22
4.1. Diagrama de las fases del proyecto	29
4.2. Funcionamiento de la herramienta de optimización	31
4.3. Representación de los distintos tipos de dato de entrada	34
4.4. Comparativa entre puntos de extracción y bolsas extraídas	35
5.1. Comparativa de los tiempos de ejecución paraa los meses del año . .	38
5.2. Comparativa de tiempos de ejecución de enero y febrero	38
5.3. Comparativa de las posibilidades de elección	41
5.4. Comparativa de bolsas de sangre extraídas	42
5.5. Puntos de extracción visitados cada mes	43
5.6. Comparativa de personal empleado	45

5.7. Comparación de recursos utilizados	46
5.8. Desglose de distancia recorrida por las UM cada día	47
5.9. Comparativa de distancia para ambas planificaciones	48
5.10. Desglose del coste incurrido para cada día	50
5.11. Comparativa del coste para ambas planificaciones	51
5.12. Visión general del calendario exportado	52
5.13. Visión de un evento del calendario exportado	53

Índice de cuadros

3.1. Datos constantes en la fase de optimización	18
3.2. Datos variables en la fase de optimización	20
3.3. Restricciones del modelo	23
5.1. Radio de acción para de los módulos	46
5.2. Precio del personal para cada módulos	49
1. Presupuesto de los recursos materiales	75
3. Coste total de los recursos	76
2. Coste de mano de obra	76
4. Gastos generales y beneficio industrial	76
5. Honorarios y presupuesto total	77

CAPÍTULO 1

Introducción y objetivos

1.1. Introducción

La sangre tiene un papel fundamental en el correcto funcionamiento del cuerpo humano. Su misión principal es la de transportar nutrientes esenciales y oxígeno a todos los tejidos y órganos del cuerpo. Además, se utiliza en pacientes con enfermedades oncológicas y en grandes operaciones quirúrgicas. A pesar de que hay estudios que revelan que se están comenzando a desarrollar técnicas para la producción de sangre de manera artificial [1, 2], aún no están lo suficientemente desarrollados como para implantarse en el sistema actual, de modo que la sangre solo puede ser proporcionada a través de donaciones procedentes de personas en un estado saludable. Esta actividad se ha convertido en necesaria e indispensable para garantizar que todas aquellas personas que se encuentren en una situación médica de extrema gravedad puedan tener a su disposición la cantidad extra de sangre y hemoderivados que necesiten para conseguir recuperarse.

Según Martín Manceñido —presidente de la Federación Española de Donantes de Sangre— en declaraciones para RTVE¹, “cada día 80 personas no mueren en España de forma irremediable gracias a una transfusión”. Y, añade, “sin sangre, aún con los mejores especialistas, no podría haber intervenciones quirúrgicas ni trasplantes”. Por lo tanto, es fundamental garantizar las 6.200 transfusiones de sangre que se realizan diariamente en nuestro país. Y es que España es conocida por ser una de las principales potencias en lo que a donaciones y trasplantes de órganos se refiere, incluyendo las donaciones sanguíneas². En nuestro país existen algo menos de dos millones de donantes activos, que según la Federación Española de Donantes de Sangre (Fedsang), se traduce en 36,64 donantes activos por cada mil habitantes, sumando 522 nuevos donantes cada día³. No obstante, se prevé que este

¹<http://www.rtve.es/noticias/20130614/cada-dia-80-personas-no-mueren-espana-gracias-transfusion-sangre/687840.shtml>
Última visita: 20/05/2019

²<https://cnnespanol.cnn.com/2019/01/14/espana-27-anos-lider-mundial-en-donacion-y-trasplante-de-organos/>
Última visita: 20/05/2019

³<http://www.rtve.es/noticias/20160613/donaciones-sangre-se-recuperan-2015-522-nuevos-donantes-cada-dia/1358020.shtm>
Última visita: 20/05/2019

número siga aumentando hasta alcanzar la media de 45 donantes activos por cada mil habitantes, cifra que la Organización Mundial de la Salud (OMS) considera idónea para garantizar el abastecimiento de sangre. En la figura 1.1 se puede ver la media de donantes de sangre por cada mil habitantes para cada comunidad autónoma en España.

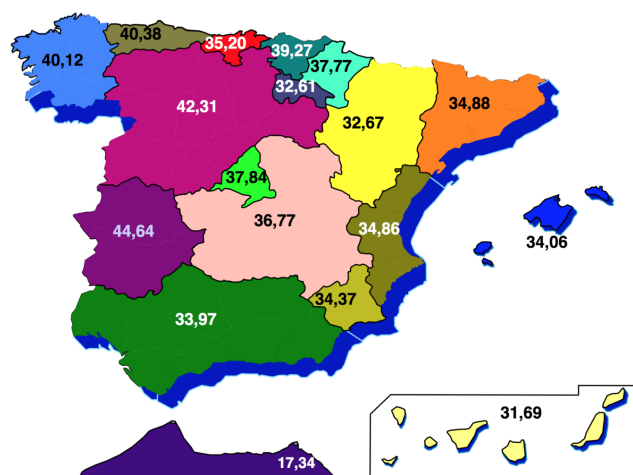


Figura 1.1: Cantidad de donantes por cada mil habitantes en España, clasificados por comunidad autónoma. Fuente: Asociación-Hermandad de Donantes de Sangre de Cantabria

En el campo de la hemodonación (donación de sangre) existen muchos problemas que, todavía hoy, o bien no han sido resueltos o la solución propuesta no es la más eficaz [3, 4, 5, 6] —como por ejemplo la gestión de la información de los donantes o las citas con los mismos—. Uno de los principales es la falta de soluciones prácticas para mejorar la organización de las colectas. Según un artículo publicado recientemente por Güre *et al.* [7], existen en la actualidad muchas soluciones y métodos destinados a cómo mejorar la cadena de suministros. No obstante, los problemas referentes a la organización de las campañas no han sido abordados con suficiente profundidad. Según el artículo mencionado, la gestión de la cadena de suministros debería tomar en consideración el factor temporal que acompaña a la *demanda*, y no solamente tener en cuenta los *ofrecimientos*. Por *demanda* se entiende la cantidad de sangre requerida por los hospitales y centros de salud, mientras que *ofrecimientos* hace referencia al número de bolsas de sangre extraídas a donantes voluntarios.

La importancia de añadir este nuevo elemento temporal es fundamental, ya que la sangre es un recurso limitado con un ciclo de vida breve, por lo que un sistema que no esté equilibrado (en ofrecimientos y temporalidad) puede propiciar un desperdicio o falta de donaciones. El artículo defiende la necesidad de crear un sistema de donación no solo acorde a las preferencias del donante sino también a las métricas y necesidades del centro. El concepto centro hace referencia a los centros de hemodonación. Estos son la entidad encargada de organizar y gestionar el conjunto de todos los recursos para garantizar un correcto funcionamiento del sistema de hemodonación. Garantiza que la sangre sea recogida y repartida a los distintos

hospitales y centros de salud, que las campañas de extracción estén correctamente planificadas y que el almacenamiento y manipulación de las bolsas de sangre sea el adecuado. Puede tratarse de un único centro por región, o bien pueden ser varios distribuidos geográficamente y trabajando de manera conjunta, con igual función.

En el desarrollo del estudio que se lleva a cabo en este Trabajo Fin de Máster, observamos que:

- Existe diferencia entre el número de personas presentadas (ofrecimientos) frente a donaciones satisfechas. Puede suceder que una persona que se presente de manera voluntaria a una extracción de sangre sea rechazada por diversos motivos, como por ejemplo, haber estado con gripe en los últimos días, o haber visitado países tropicales recientemente. Por lo tanto, existe un factor de reducción en la planificación de las colectas. La figura 1.2 muestra la diferencia real que existe entre la previsión de donaciones y las donaciones finalmente realizadas. Como se puede apreciar, cuanto mayor es la previsión de donaciones, mayor es la dispersión del error cometido con la estimación. La experiencia del equipo gestor del centro ha conseguido que la media de donaciones satisfechas se mantenga cercana a la prevista. No obstante, como veremos a lo largo del manuscrito, la previsión estimada/planificada diaria no se consigue que sea la ideal, pudiendo dar lugar a desabastecimientos e ineficiente gestión de recursos.

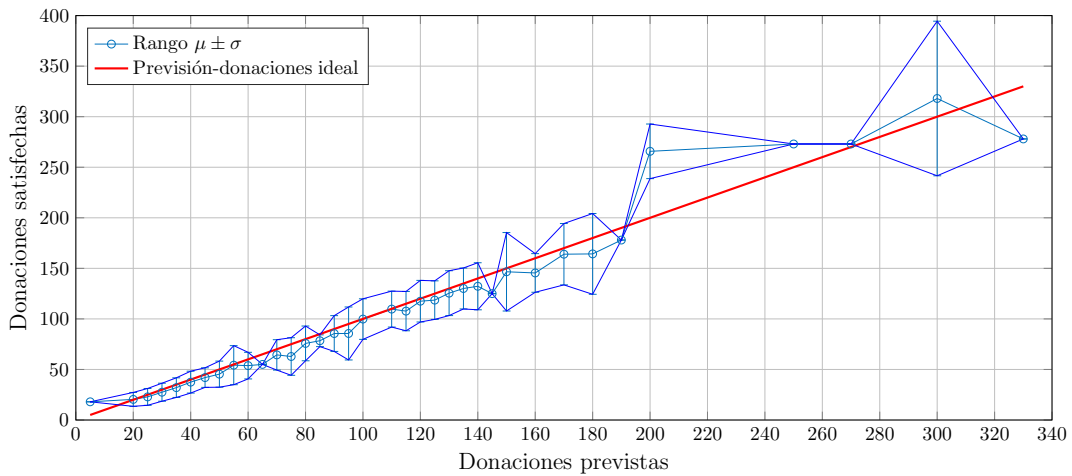


Figura 1.2: Representación de la cantidad de personas previstas atender frente a las donaciones realizadas para el caso real del Centro de Hemodonación de Murcia

- Es necesario realizar una correcta planificación de la demanda para asegurar un buen suministro. De la sangre que se extrae en las colectas se obtiene productos hemoderivados como: hematíes, plasma y plaquetas, siendo necesarias hasta cinco bolsas de sangre para obtener una unidad de estas últimas. La previsión debe estar ajustada a este hecho, para así garantizar el abastecimiento de cada producto hemoderivado y evitar también el desperdicio del mismo.
- Hay que considerar en la planificación el estado del almacenamiento de bolsas. Una vez que la sangre ha sido extraída, se almacena para que pueda ser

utilizada a posteriori. No obstante, un punto problemático es que la fecha de caducidad que tienen los hemoderivados es muy dispar: 42 días para hematíes, 2 años para plasma y 5 días para plaquetas. De esta forma, la demanda debe estar planificada teniendo en cuenta el estado del almacenamiento y la necesidad de cada producto.

- Existen criterios a considerar en la elección de los puntos de colecta (también llamados puntos de extracción). Existe una periodicidad entre las donaciones de un paciente que no puede ser superada, y debe ser mayor o igual a 3 meses en el caso de los hombres, y 4 en el de las mujeres.
- Hay que gestionar muy bien el uso de equipos y personal sanitario. Los recursos que son necesarios desplegar en cada una de las campañas de extracción, como material y equipo médico, administrativos, conductores o comida suponen un coste para el centro de hemodonación que se debe tener en cuenta. No todo el personal clínico es siempre personal de plantilla fijo, sino que puede ser subcontratado según las necesidades. Teniendo, además, un coste de subcontratación dependiente de la distancia de desplazamiento del almacén (centro de hemodonación) a los puntos de extracción.

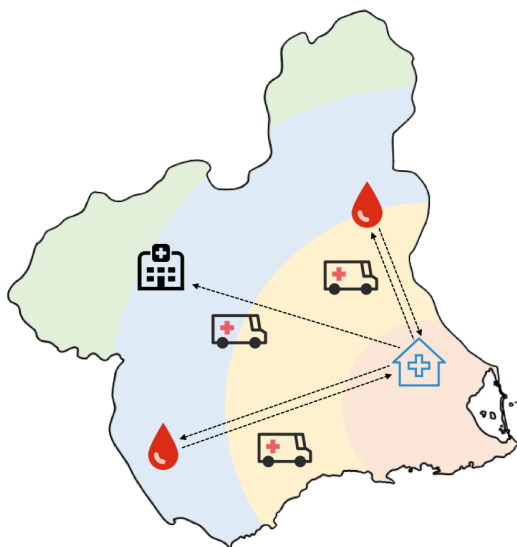


Figura 1.3: Representación del sistema actual de hemodonación en la región de Murcia, con los distintos puntos de extracción a los que se acude y los hospitales a los que se da suministro

En el presente trabajo se va a realizar un caso de estudio real de la optimización y automatización de la planificación de las colectas del Centro Regional de Hemodonación (CRH) de la Región de Murcia. En este centro, la planificación de las campañas de donación de sangre se realiza de manera manual, mes a mes. Para ello, una persona se encarga de asignar los distintos recursos de los que dispone el centro (cuatro vehículos, conductores y equipo médico y administrativo) para que acudan a los distintos puntos de extracción existentes en la región. Estos puntos están distribuidos geográficamente por toda la comunidad autónoma y además, al

tratarse de un servicio público, es necesario garantizar cierta periodicidad en acudir a ellos. En la figura 1.3 se puede apreciar una representación del sistema actual. La región se encuentra dividida en cuatro módulos en función de la distancia que haya entre el CRH y el punto de extracción. A estos últimos acude el equipo médico y administrativo en las unidades móviles disponibles para realizar las extracciones pertinentes. El CRH, tras procesar y almacenar la sangre, se encarga de enviarla a aquellos hospitales y centros de salud que requieran abastecimiento.

El objetivo de esta planificación es mantener estable un número de bolsas de sangre para así satisfacer a los hospitales a los que se da suministro. Sin embargo, esta planificación no es eficiente a día de hoy ya que hay que tener en cuenta muchas restricciones como: días festivos, movimientos de la población en periodo estival, eventos deportivos, eventualidades concretas de cada punto de extracción, *etc.* Todas estas restricciones dan lugar a desviaciones con respecto a la media deseada de más de un 25 %, lo que puede provocar insuficiencia de sangre en el centro. Además, para la selección de los puntos de colecta se debe tener en cuenta las limitaciones en la capacidad de las unidades móviles y del equipo humano disponible. En la figura 1.4 se muestra la el número de las personas presentadas (ofrecimientos) junto al % de rechazo (error cometido en cada estimación para el caso concreto del Centro Regional de Hemodonación). Como se puede apreciar y tal y como se acaba de comentar, hay estimaciones en las que el error cometido alcanza el 25 %, siendo muy pocas las planificaciones en las que se consigue un error nulo.

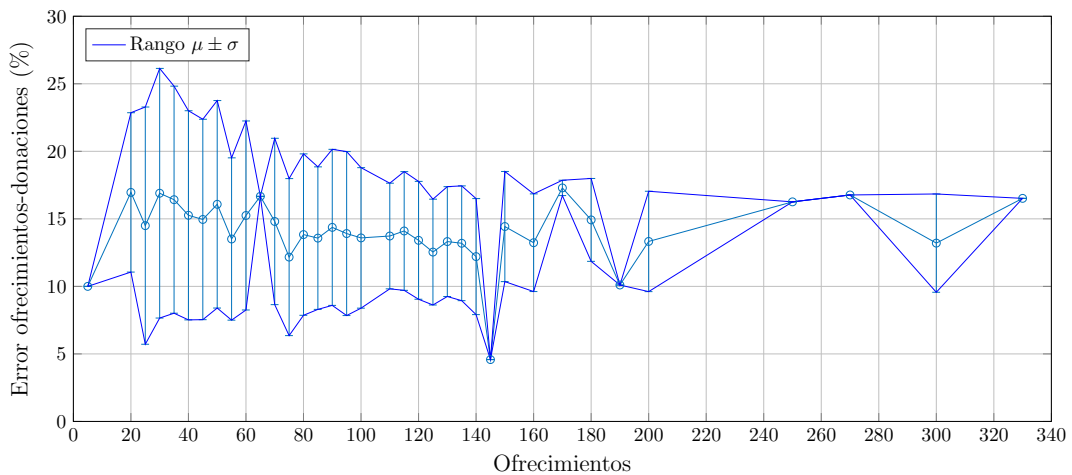


Figura 1.4: Representación de la estimación de personas presentadas junto al porcentaje de error cometido en la estimación para el caso concreto del Centro Regional de Hemodonación de Murcia

Como se describe a continuación, en este trabajo se ataca el problema de la planificación de la previsión. Una optimización de la previsión permitirá en el futuro atacar el problema de los rechazos en los ofrecimientos descritos en la figura 1.4.

1.2. Objetivos

El presente Trabajo Fin de Máster nace con la necesidad de mejorar el sistema actual de planificación de colectas, creando un modelo de optimización de las campañas de donación de sangre. Para ello, el trabajo consistirá en el desarrollo e implementación de una herramienta para el modelado y optimización, con el fin principal de mantener estable el número diario de bolsas de sangre extraídas. De esta forma se conseguirá satisfacer, de manera continua en el tiempo, a los hospitales a los que se da suministro en la Región de Murcia. Además, se garantizará a su vez un equilibrio en la demanda y en el almacenamiento de la sangre. La herramienta tomará como datos de entrada el histórico de todas las donaciones realizadas en la región entre los años 2007 y 2017, proporcionando como resultado un calendario donde se podrá consultar la información relativa a cada colecta (localidad, vehículos, horario, cantidad de bolsas de sangre previstas recoger, *etc.*). Los objetivos fijados para el trabajo son:

- Modelado de los puntos de colecta basado en un histórico de donaciones y su localización.
- Desarrollo de una herramienta de optimización usando *Mixed-Integer Linear Programming* (MILP).
- Elaboración de un modelo óptimo de planificación mensual según las necesidades diarias del centro.
- Minimizar la diferencia de donaciones entre días de colecta a lo largo del mes, para mantener una entrada constante.
- Minimizar la diferencia del número de donaciones totales deseadas (demanda) y recibidas (ofrecimientos), por exceso y por defecto, teniendo en cuenta la capacidad de gestión del banco de sangre y su *stock*.
- Facilitar al personal de coordinación del centro un calendario primigenio al que poder añadir más restricciones para optimizaciones sucesivas por iteración.

En este primer capítulo 1 de introducción se ha presentado la situación general del sistema de hemodonación en España y el caso concreto del Centro de Hemodonación de Murcia, así como los objetivos a conseguir con el presente trabajo. En el capítulo 2, referente al estado del arte, se estudiará la literatura científica y herramientas similares que han inspirado a la solución de este proyecto. En el capítulo 3, Metodología, se describirá el flujo de trabajo propuesto para solucionar el problema. El capítulo 4, Herramientas e implementación, explica los datos y las herramientas utilizadas para implementar la metodología propuesta, para dar como resultado el capítulo 5, donde se analizarán los resultados obtenidos, comparándolos con el modelo de planificación actual que se realiza de manera manual en el centro. Por último, en el capítulo 6 se expondrán las conclusiones y líneas futuras de este trabajo.

CAPÍTULO 2

Estado del arte

Con el fin de poder desarrollar la herramienta de la manera más eficaz y precisa posible se han estudiado distintos casos de aplicación. Primero, se ha estudiado la optimización de sistemas de distribución con un carácter general para, a posteriori, centrar el estudio en aquellos sistemas aplicados al ámbito de la hemodonación.

2.1. Optimización de sistemas de distribución

Una de las principales ventajas que tiene el avance de la tecnología es que nos brinda la posibilidad de desarrollar herramientas y métodos para la resolución de problemas que, sin la ayuda de éstos, eran prácticamente imposibles de resolver. En el caso concreto de los problemas de optimización, a pesar de que existen algoritmos desde hace mucho tiempo, no se disponía de equipos de cómputo con suficiente rendimiento y capacidad como para abordar problemas de grandes dimensiones. Gracias al avance de las tecnologías de computación, se han podido desarrollar modelos y herramientas como los que a continuación se presentan.

El artículo de De la Cruz *et al.* [8] presenta una solución a la distribución de productos petrolíferos a través de oleoductos. Su objetivo principal es transportar distintos productos a través del mismo oleoducto, mejorando así el sistema de transporte convencional. Para ello utilizan dos metodologías distintas: por un lado, un algoritmo multi-objetivo (MOEA, del inglés *Multiobjective Evolutionary Algorithm*), donde se definen diversas funciones objetivo para determinar la solución ideal, así como la relación entre dichas funciones; y, por otro lado, un algoritmo de programación lineal, basado en parámetros constantes cuyo valor no se puede modificar (MILP, del inglés *Mixed Integer Linear Programming*). Los resultados muestran que para ambos métodos se alcanzan soluciones válidas. No obstante, estos son aún mejores en el caso de que se emplee un método híbrido que aúna ambas metodologías.

Se han estudiado distintos artículos relativos a la optimización de sistemas de distribución [9, 10, 11, 12]. Uno de los más interesantes que cabe mencionar es

el de Pereira *et al.* [13]. En este caso, el objetivo es el diseño óptimo de una red de distribución de agua, de forma que se minimice el coste del sistema y se cumpla con una serie de restricciones como presión, caudal, velocidad, *etc.* Para lograr la solución objetivo, la herramienta utiliza algoritmos de evolución gramatical —una clase de algoritmos metaheurísticos—. En el artículo, se muestra cómo la herramienta es capaz de alcanzar soluciones óptimas para la red de grandes ciudades.

La herramienta que se desarrolla en este Trabajo Fin de Máster, trata de resolver un problema de *scheduling*. Es por ello que también cabe mencionar otros proyectos relevantes en este campo. Uno de los más famosos es el problema de planificación de la enfermera¹ (*Nurse Scheduling Problem*, NSP). Este problema describe la situación rutinaria que se vive en los hospitales a la hora de asignar los distintos turnos y horarios al equipo de enfermería. La idea es encontrar un calendario óptimo que satisfaga tanto las necesidades del hospital como las necesidades individuales de las enfermeras, teniendo siempre en cuenta las limitaciones y restricciones existentes de horarios, días libres... Este problema es de complejidad NP-*Hard* y ya ha sido resuelto mediante MILP [14], obteniendo un resultado satisfactorio para las restricciones planteadas (turnos, enfermeras disponibles, días a planificar, coste y vacaciones). NP² hace referencia a un conjunto de problemas que no pueden ser resueltos en un tiempo polinómico. Dentro del conjunto de problemas NP está la clase NP-*Hard*³, que es aquella que contiene a los problemas de decisión que son como mínimo tan difíciles como un problema de NP. El resultado al NSP supone una mejora en términos de recursos y de tiempo empleado en la planificación —realizada de manera manual— que ha sido tomada como referencia en muchos centros sanitarios.

Los problemas de tipo *scheduling* suelen ser una combinación lineal de una serie de parámetros de entrada, de modo que, al igual que en el NSP, una de las técnicas que mejor funciona es MILP. De hecho, en la actualidad, existen otras herramientas que se basan en esta metodología [15, 16, 17, 18, 19]. A continuación se estudian las más relevantes.

Una de estas herramientas es la propuesta por Duquenne *et al.* [20], que propone un modelo para la programación de proyectos que combine la asignación de horarios flexibles con las distintas habilidades que tenga la mano de obra. Estos dos problemas están interrelacionados, ya que la duración de las tareas no está predefinida, sino que depende del número de trabajadores asignados a ella y de sus niveles de habilidad. Además, en este modelo se incorpora la formación eficiente de equipos, es decir, la asignación de un trabajador experto y uno o más trabajadores de aprendizaje con el propósito de desarrollar habilidades nuevas gracias a la transferencia de conocimientos. El modelo proporciona como resultado un calendario para el proyecto, incluyendo la fecha de inicio y fin de todas las tareas así como su asignación a los diferentes trabajadores.

De cara a la realización del presente trabajo y, basados en los resultados

¹<https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/es/OPLStudio/usroplide/topics/opl-ide-relax-present.html>
Última visita: 30/05/2019

²<https://www.xatakaciencia.com/matematicas/p-versus-np-nunca-lo-entendiste> Última visita: 30/05/2019

³<https://es.wikipedia.org/wiki/NP-hard> Última visita: 30/05/2019

obtenidos por [8, 14, 20], se ha decidido utilizar la metodología MILP. La razón fundamental es debido a que este trabajo—igual que los mencionados anteriormente— es de tipo *scheduling*. Donde, o bien las decisiones son en muchos casos binarias, o bien las variables se pueden describir con enteros (*Integer*). Algunas de las variables son reales en lugar de enteros, por lo que se trata de un modelo mixto (*Mixed-Integer*). Además hay que tener en cuenta que es un problema lineal (*Linear*), donde las soluciones serán combinaciones lineales de las variables de entrada. Estos problemas de optimización lineal con variable real se pueden resolver de manera exacta con algunos algoritmos como por ejemplo *SIMPLEX*, o por otros algoritmos clásicos analíticos muy eficientes que suelen encontrar el óptimo global si la combinatoria no es excesiva (Branch & Bound, Barrier, *etc.*). Si la combinatoria es excesiva, igualmente pueden encontrar óptimos locales de forma analítica y eficiente.

Por tanto, usar cualquier otra técnica aquí, conlleva emplear grandes recursos para resolver un problema que no requiere de dicho esfuerzo. Cualquier método heurístico (o meta-heurístico) como MOEA se usa cuando: (i) no hay formulación matemática posible, y/o (ii) la evaluación de la función objetivo requiere ejecutar evaluación de la optimización realizadas por un agente externo. Por lo tanto, nuestro problema no se da lugar a esta metodología.

2.2. Sistemas de hemodonación

La optimización de los sistemas de hemodonación la podemos atacar desde dos puntos de vista diferentes: (i) antes del momento de donación, y (ii) durante el proceso de donación.

- Por un lado, la optimización *a priori*, es decir, la optimización del proceso anterior a la donación. En el estudio realizado por el Centro Regional de Hemodonación [21], se realizan mediciones sobre diferentes factores que afectan al nivel de hemoglobina de los pacientes, minimizando así el número de rechazos y desarrollando modelos para poder predecir el nivel concreto de hemoglobina el día de la donación, lo que permitiría emplazar al donante de forma inequívoca. Sin embargo, estos modelos no están en funcionamiento todavía. Por otro lado, también se realiza el *scheduling* mencionado anteriormente. En este ámbito no existe literatura al respecto cuando, en realidad, tiene también importancia a la hora de asegurar una correcta planificación de las campañas de donación de sangre. El objetivo de éste, es reducir el tiempo malgastado y reducir la diferencia entre personas presentadas y extracciones realizadas. Existen modelos aplicados a otras áreas, como ya se ha visto en el apartado anterior, que servirán de inspiración para el desarrollo del trabajo.
- Por otro lado, la optimización *a posteriori*, incluyendo principalmente la optimización del *stage* de donación. En este campo si que existe literatura al respecto: ubicación de puestos, cantidad de personal, tiempos de espera. Como se verá a continuación, son muchas las iniciativas que se han llevado a cabo para mejorar el proceso de donación. También se incluyen en este apartado

procedimientos como campañas de marketing para atraer a un mayor número de donantes.

En el artículo escrito por Güre *et al.* [7] se hace referencia a la importancia que tiene el factor temporal en las campañas de donación de sangre. Por un lado, hay que tomar en consideración la variación temporal de la demanda y, por otro, el tiempo empleado en el proceso de extracción. Hay una gran cantidad de artículos que hacen referencia a este último. Uno de ellos, de Golden *et al.* [22], trata sobre la optimización del tiempo que deben pasar los donantes norteamericanos en las estaciones de donación de sangre cada vez que acuden a una extracción. La idea principal es tratar de reducir el tiempo que pasan a lo largo de las seis fases de las que se compone el proceso: registro, vitales, historial, consentimiento, extracción y recuperación. En estos puestos de donación la atención es en orden de llegada, con independencia de si se tenía cita o era un donante puntual, de modo que normalmente los puestos se colapsaban, haciendo que muchos de los donantes se frustrasen y acabasen abandonando el proceso. El modelo desarrollado propuso una solución para la reducción del tiempo de tránsito, incrementando el número de donantes sin por ello incrementar la espera. En la figura 2.1 se puede apreciar una representación de un *stage* de donación en Estados Unidos, con las distintas fases por las que tiene que pasar el donante para proceder a la extracción de sangre.

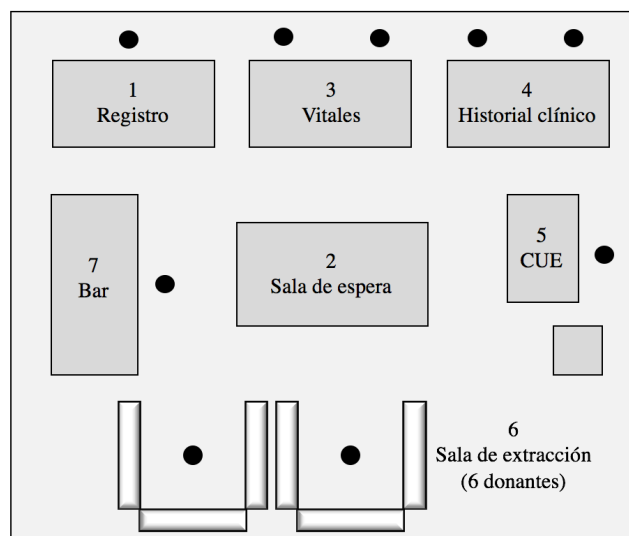


Figura 2.1: Representación de las distintas fases que tiene que pasar un donante en los puestos de extracción de sangre en Estados Unidos, donde cada punto negro representa un trabajador

Otro estudio relativo a las mejoras de los sistemas de recolección es el propuesto por Augusto *et al.* [23]. En este artículo se propone un modelado y simulación de un sistema de recolección basada en la mejora de los recursos humanos disponibles, con el fin de reducir el coste y los abandonos de donantes. Este estudio, realizado en varias de las ciudades más grandes de Francia, nace por el incremento constante que está surgiendo en este país en lo que a demanda de sangre se refiere. Ante esta situación, en la que cada vez se necesitan más donantes, la importancia

de reducir los costes, así como de facilitar el proceso de extracción a los donantes, es vital para garantizar un correcto funcionamiento del sistema. Para ello, propusieron una primera solución basada en una Red de Petri de modelos, seguido de una evolución de esta solución a modelos de simulación con descripciones precisas de algunos de los parámetros más relevantes en el proceso de extracción: tiempo de llegada del donante, abandono, material, distribución de la colecta, *etc.* El resultado de la optimización les permitió reubicar a los operarios en función del tipo de centro y momento del día, acorde a la previsión de donantes. Con esta mejora de la eficiencia los tiempos de espera y el abandono de los donantes se redujo considerablemente, aumentando la cantidad de extracciones.

Otro artículo de relevancia estudiado en esta materia fue presentado por Rappoport *et al.* [24]. En la misma línea que los anteriores, los autores desarrollaron un modelo de optimización para estudiar el servicio al cliente y ciertos parámetros de productividad para las unidades de la Cruz Roja de Estados Unidos. El problema, al igual que en los estudios citados anteriormente, era el largo periodo de espera que tenían que pasar los donantes, afectando así al ánimo y la voluntad de donar sangre que tenían. El modelo, basado en los distintos parámetros y factores del proceso de extracción, propone como solución una modificación de la ubicación de las distintas fases que hay que pasar, de la distribución del personal y de los procedimientos a seguir. Como resultado, la experiencia de usuario incrementó, simplificando la complejidad de citas y extracciones y aumentando el número de donantes.

Dejando a un lado la literatura, en lo que a la práctica se refiere, también existen aplicaciones que se encargan de la gestión del componente humano en las campañas de donación de sangre. Un ejemplo de ellas es Hematos IIG⁴, del grupo Medinfo. Esta plataforma se encarga de la gestión y organización de bancos de sangre, tejidos, células madre, *etc.* Esta gestión integral de los componentes humanos permite beneficiarse tanto a los bancos de sangre —compartiendo y sincronizando información clínica de los pacientes con los sistemas de información hospitalaria— como a los centros regionales, compartiendo y sincronizando la información de hemoderivados y transfusiones con todos los hospitales de un área.

Otra aplicación que cabe mencionar es eProgres⁵, de Mak-System. Esta aplicación se encarga también de la gestión de los recursos humanos que componen el proceso de donación. Aspectos relativos a donantes, como identificación, pruebas o revisiones se gestionan directamente con esta herramienta. Dispone de distintos módulos que se pueden contratar en función del centro, además de servicios adicionales como aplicación móvil para donantes, cuestionarios *online*, interfaces avanzadas con mayor cantidad de datos representados, *etc.*

En definitiva, como se ha visto, existe una gran cantidad de estudios y metodologías para reducir el tiempo que tiene que pasar una persona cuando está donando sangre. No obstante, no se ha encontrado en la literatura ni en la industria ningún procedimiento para optimizar las campañas de donación de manera específica, teniendo en cuenta parámetros como la ubicación de los puntos de

⁴<https://www.actasanitaria.com/bull-impulsara-la-plataforma-de-medinfo-para-la-gestion-de-componentes-humanos/>
Última visita: 20/05/2019

⁵<http://www.mak-system.com/plasma-centers/> Última visita: 20/05/2019

extracción, recursos y cantidad de sangre necesaria. Por ello, este trabajo pretende ser punta de lanza de un proyecto de investigación que persigue la optimización del los procesos de donación previa a esta.

CAPÍTULO 3

Metodología

En este capítulo se presenta la metodología seguida para la obtención de los resultados que se presentan en este proyecto (ver Capítulo 5). Se trata de una herramienta capaz de proponer una planificación para las campañas de donación de sangre en la Región de Murcia. La metodología propuesta incluye el proceso de optimización y los elementos de modelado de datos en los que se basa la herramienta.

El problema es computacionalmente complejo, NP-*Hard*. Hay que tener en cuenta un gran número de singularidades (restricciones en la optimización) que surgen en la planificación de las campañas que, a día de hoy, se hacen de forma manual. Esta metodología es una primera aproximación, como punto de partida estable, en el que se determinan resultados con los que poder trabajar y seguir desarrollando una herramienta más avanzada. Hay que tener en cuenta además que no hay literatura ni modelos aplicados en este campo (optimización de las colectas de un centro de hemodonación), de modo que todo el trabajo realizado es punta de lanza en esta área y servirá de base para futuras mejoras e implementaciones —tanto a nivel comercial como de investigación—.

El sistema desarrollado pretende servir de ayuda para la planificación de las campañas de donación de sangre. Este proceso puede llegar a resultar muy complejo por la gran cantidad de variables y factores que hay que tener en cuenta: historial de donaciones, días festivos, época del año, movimientos de la población, oferta, demanda, almacenamiento del centro, imprevistos, *etc.* A día de hoy este proceso lo realiza de manera manual un operario del Centro de Hemodonación, con los riesgos y dificultades que ello conlleva, además de los costes en tiempo y recursos humanos. Esta herramienta nace pues con la necesidad de ayudar a facilitar esta tarea a los trabajadores del centro, logrando una solución óptima en base a los criterios que ellos mismos fijen, y evitando así, en la medida de lo posible, el factor de error humano que se introduce en la planificación. En la figura 3.1 se puede apreciar la estructura general que tiene la herramienta así como el flujo de información en ella.

Para lograr el desarrollo de la herramienta, se realizarán diferentes iteraciones que vayan aproximando a la misma hacia la solución final fijada para el trabajo y que, a su vez, sirvan de base y guía para futuras mejoras. Durante estas iteraciones

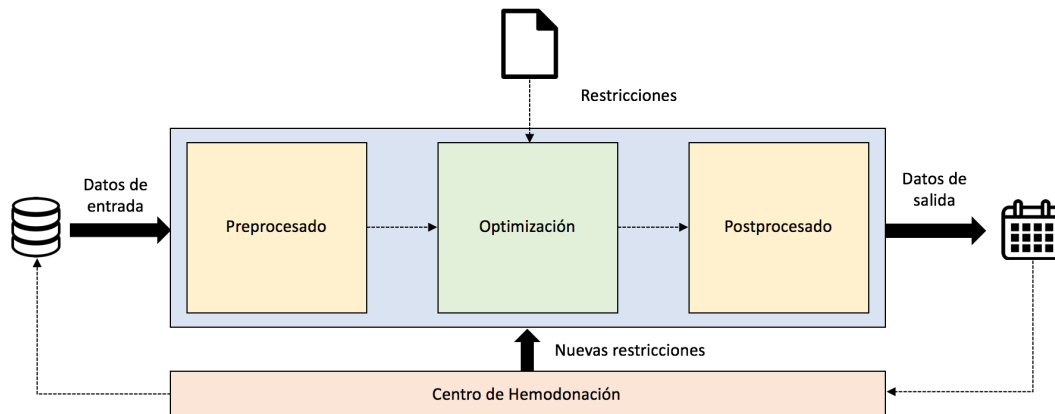


Figura 3.1: Diagrama general del funcionamiento de la herramienta de planificación de colectas así como el flujo de información en la misma

se irán añadiendo limitaciones y restricciones reales tenidas en cuenta en el centro. A su vez, se implementará como resultado un calendario que facilite al personal del centro la visualización de la solución optimizada. Además del calendario se facilitarán distintos archivos con los datos de salida en formato de hoja de cálculo.

En la figura 3.2 se puede ver una comparativa de la representación del proceso de planificación llevada a cabo en la actualidad, en la que se tarda del orden de días en definir, y la que pretende realizar la herramienta, del orden de segundos. La comparativa muestra cómo la herramienta va a reducir el nivel de complejidad a la hora de tomar decisiones sobre la planificación.

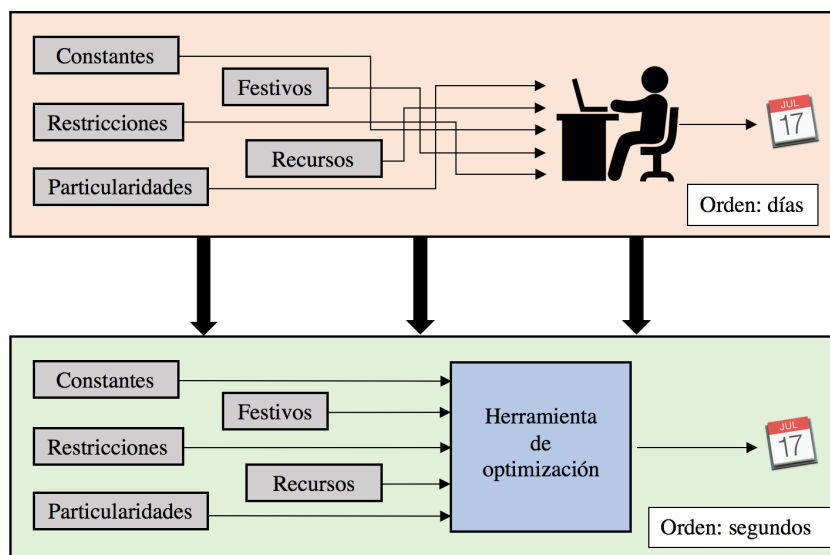


Figura 3.2: Comparación del proceso de planificación llevado a cabo antes y después del desarrollo de la herramienta

A lo largo de este capítulo se presenta la metodología empleada. Se comenzará describiendo el problema desde un punto de vista general para, a continuación,

explicar el proceso de optimización: desde el modelado de los datos hasta su presentación, pasando por la fase de optimización. Se pretende guiar al lector por la estructura de la herramienta para llegar a una fácil comprensión de los resultados obtenidos.

3.1. Marco general de optimización

En vista de las carencias de la forma actual de trabajo en el centro mostrado al inicio del capítulo, se propone un sistema de optimización mono-objetivo con el fin de optimizar el número de donaciones satisfechas. El objetivo es lograr que el centro consiga alcanzar la cantidad diaria de bolsas de sangre fijadas en base al historial de las extracciones realizadas en años anteriores. Para el primer modelo de optimización que proponemos, el centro necesita los siguientes datos de entrada:

- **Identificador de los puntos de extracción activos.** El sistema basará las previsiones de extracción en función del historial recogido en su base de datos. Es por tanto necesario identificar de manera inequívoca a cada uno de los puntos mediante un identificador.
- **Fechas de visita.** Debido a la diferencia en el tiempo que existe a lo largo del año en la curva de oferta y demanda de bolsas de sangre, es necesario también clasificar las extracciones por meses, pues el procedimiento de planificación de colectas es mensual.
- **Tipo de punto de extracción.** Existen dos tipos de puntos de extracción: los móviles, aquellos en los que una unidad móvil se desplaza hasta el lugar o evento y se realizan extracciones de manera puntual; y fijos, aquellos centros en los que el donante puede acudir a lo largo de todo el año.
- **Estadísticos históricos.** Base de datos con el conjunto de todas las extracciones realizadas en un punto determinado.
- **Turnos.** Cada punto de extracción tiene asignado un horario de mañana, de tarde o de día completo. Este es un aspecto relevante ya que si a un punto de extracción se acude siempre de mañana, es necesario continuar en ese horario, ya que sino los estadísticos no servirían para ir por la tarde.
- **Unidades móviles disponibles y capacidad.** Flota de vehículos de la que dispone el centro para acudir a los puntos de extracción, así como la capacidad (número de bolsas de sangre) que pueden soportar.
- **Restricciones.** Limitaciones a tener en cuenta para la planificación de las campañas de recolección. Por ejemplo, no superar la capacidad de las unidades móviles, tener en cuenta picos de carga, no realizar extracciones en días festivos, *etc.*

Para la representación y evaluación de los resultados obtenidos por la herramienta necesitaremos, además:

- **Nombre de los puntos de extracción.** Nombre asignado a cada punto de extracción. Cada código mencionado anteriormente está ligado a un nombre concreto.
- **Personal.** Cantidad de personas que son necesarias para cada una de las colectas. Viene determinado por el número de bolsas de sangre previstas a recoger. Existen dos tipos de personal: por un lado, el personal interno del centro, contratados por el propio CRH; por otro, personal externo subcontratado a terceros.
- **Módulo.** En función de la distancia a la que se encuentre el Centro de Hemodonación del punto de extracción, se asigna al punto de extracción en cuatro módulos diferentes.
- **Costes de personal.** Coste que le supondrá al centro la utilización de recursos humanos (conductor, médicos, enfermeros y administrativos). El coste es una cantidad que varía en función de la distancia (módulo) al punto de extracción.
- **Estadístico de previsión de donantes.** Base de datos con el conjunto de todas las previsiones de donantes realizadas por el centro para cada una de las salidas a los puntos de extracción.

3.2. Modelado de los datos

Con el fin de poder introducir los datos en la herramienta de optimización, ha sido necesario realizar un modelado de los datos contenidos en la base de datos proporcionada por el centro. Para ello, utilizando el lenguaje de programación Java, se ha creado una estructura de objetos para extraer la información. El objetivo principal es crear —en función de los requisitos y necesidades de la fase de optimización— objetos y clases con los que manipular los datos de entrada. Cada clase, como se puede ver en la figura 3.3, está contenida en la siguiente forma jerárquica, creando de esta manera una clase de clases con la que poder manipular la totalidad de los datos.

El objeto *Month* es el primero en utilizar datos del archivo original. El objetivo principal es almacenar, para cada punto de extracción y mes, los datos estadísticos más relevantes. Por lo tanto, los atributos que conforman la clase son la media y desviación típica de los datos de los que se dispone: (i) previsión de personas que se espera se presenten, (ii) personas que finalmente se han presentado y (iii) extracciones realizadas; además del nombre identificativo de cada mes.

Posteriormente, estos datos se introducen en el objeto *EstadisticaAnual*, que agrupa los estadísticos de los doce meses que conforman un año. El objetivo es tener toda la información numérica de un punto de extracción contenida en la misma clase, de forma que sea mucho más fácil la consulta y manipulación de los datos relativos a dicho punto. La clase está formada por doce objetos de la clase *Month*, que se corresponden con los datos de cada uno de los doce meses creados anteriormente.

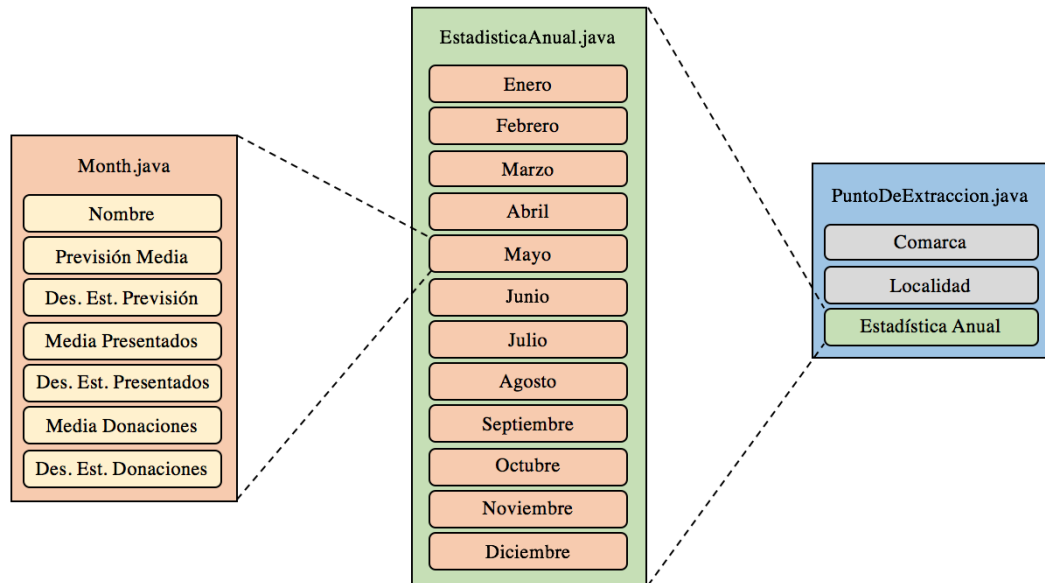


Figura 3.3: Diagrama de la estructura de datos creada en Java para el modelado y manipulación de los datos de entrada

A continuación el objeto *PuntoDeExtraccion* añade el nombre del punto de extracción y la comarca a la que pertenecen los estadísticos anteriores. El objetivo de este es tener un objeto que caracterice por completo a cada punto de extracción. El objeto está formada por un atributo del tipo *EstadisticaAnual*, así como otros dos para el nombre del punto y de la comarca.

Por último tenemos la conversión de datos (el *parseado* de datos, *ParseCSV*). Este, tiene una finalidad diferente a las anteriores que acabamos de comentar. En este caso no se añaden más datos para modelar y caracterizar objetos, sino que su fin es que estos se rellenen con la lectura del fichero del histórico de donaciones. Para ello, el objeto leerá el fichero en formato *CSV* proporcionado por el centro, creando de manera automática los objetos descritos por las clases anteriores.

3.3. Optimización

La optimización se corresponde con el proceso de búsqueda de la solución óptima. Para ello, apoyándonos en el software IBM ILOG CPLEX Optimization Studio, se dividirá el proceso de optimización en tres partes, siendo cada una de ellas una iteración hacia la solución final. Se pretende abordar dicha solución de menor a mayor grado de cumplimiento de restricciones, haciendo así el proceso completo más sencillo que si se abordase en una sola iteración.

En este capítulo, para simplificar la lectura y hacerla más comprensible para el lector, se presenta únicamente la tercera y última iteración. Esta, como se puede ver en la figura 3.4, engloba a las dos primeras, de modo que estas también quedan caracterizadas en la solución final. Tanto las variables como los valores constantes

de entrada, han sido comunes para las tres iteraciones de la herramienta. Los únicos parámetros que han sido añadidos en cada iteración han sido las restricciones. En caso de que el lector quisiera consultar las restricciones relativas a cualquiera de las dos primeras iteraciones, estas se encuentran disponibles en el Anexo I.

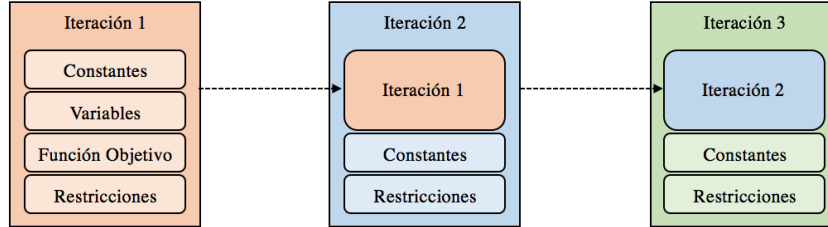


Figura 3.4: Diagrama de las distintas iteraciones que componen el desarrollo de la herramienta

En primer lugar se van a describir las constantes que se han utilizado para el desarrollo de la herramienta. Posteriormente, se describen las variables utilizadas en el modelo para, en último lugar, describir la función objetivo y las restricciones que determinarán el valor de las variables.

3.3.1. Constantes

En el cuadro 3.1 se muestra un resumen de las constantes, con su nombre, símbolo, tipo de dato y número de entradas:

Constante	Símbolo	Tipo de dato	Entradas
Puntos de extracción	PE	Texto	293
Meses	m	Texto	12
Donaciones pasadas	DP	Entero	3516
Vehículos	U	Texto	4
Capacidad de las unidades móviles	C	Entero	4
Día	D	Entero	31
Desviación de donaciones pasadas	σ_{dp}	Entero	3516
Constante Anual	CA	Entero	1
Demanda diaria	DD	Entero	1
Días laborables	DL	Entero	372
Proporción de jóvenes	P1	Entero	1
Proporción verano	P2	Entero	1
Meses de Verano	MV	Texto	4
Cantidad mínima	Cmin	Entero	1
Vísperas	V	Entero	372
Turnos	T	Entero	293
Prioridades	P	Entero	293

Cuadro 3.1: Datos constantes en la fase de optimización

Las constantes son aquellos parámetros cuyos valores permanecen fijos para todo el proceso de optimización llevado a cabo por la herramienta. A continuación, se describe cada una de ellas:

- **Punto de Extracción (PE)**. Nombre de todos los lugares o eventos reflejados en la base de datos del centro donde se han realizado campañas de donación de sangre entre los años 2007 y 2017.
- **Mes (m)**. Nombre de los doce meses que conforman un año.
- **Donaciones pasadas (DP)**. Media de las donaciones realizadas en cada uno de los puntos de extracción definidos en la primera constante, para cada uno de los meses del año. Se trata de un array bidimensional que ordena estos estadísticos por lugar y mes.
- **Vehículos (U)**. Nombres de los cuatro vehículos de los que dispone el centro para realizar las colectas.
- **Capacidad de las unidades móviles (C)**. Capacidad de los vehículos descritos en la constante anterior.
- **Día (d)**. Rango de datos que comprende los valores de 1 a 31. Representa el día del mes en el que se está.
- **Desviación de donaciones pasadas (σ_{dp})**. Desviación típica de las extracciones realizadas en cada punto de extracción, para cada mes del año.
- **Constante anual (CA)**. Valor numérico que multiplicará a la cifra de demanda de bolsas diaria estimada. Representa la tasa de crecimiento interanual que quiera fijar el centro. Para este modelo se ha tomado una tasa de crecimiento del 10%.
- **Demanda diaria (DD)**. Valor objetivo de bolsas de sangre diarias a recoger. Es multiplicada por la tasa de crecimiento interanual.
- **Día laboral (DL)**. Array binario bidimensional que representa, para cada mes del año, los días laborales y festivos. Tomará el valor 1 para aquellos días laborables y un valor 0 para los que no lo sean.
- **Proporción de jóvenes (P1)**. Valor que debe tomar el porcentaje de bolsas de sangre recogidas en colegios, institutos y universidades para los meses lectivos.
- **Proporción verano (P2)**. Constante que funciona de manera similar a la anterior. Se corresponde con los meses de verano (junio, julio, agosto y septiembre), en los que las extracciones a estudiantes son menores. La proporción de jóvenes descrita anteriormente será ahora del valor que marque esta constante, para nuestro trabajo será del 5%.
- **Meses de vacaciones (MV)**. Meses de junio, julio, agosto y septiembre. Se corresponden con los meses en los que no hay clase en los centros educativos.

- **Cantidad mínima** (Cmin). Número mínimo de bolsas de sangre a extraer en cada punto para que sea rentable la colecta. Se fija en 20 por el centro.
- **Vísperas** (V). Array bidimensional con el conjunto de todos los días que forman un año, indicando cuáles son laborables, festivos y vísperas de festivo. En el caso de que sea laborable o festivo, tomará valores 0 ó 1 respectivamente. Si por el contrario fuese víspera de festivo, será 1.05, para así introducir un factor de 5 % extra. Este incremento para los días que son víspera se realiza con la idea de tener provisiones suficientes para los días no laborables (es una estimación empírica añadida por el centro).
- **Turnos** (T). Array binario que representa los turnos que tiene reflejado cada punto de extracción en el historial. Tomará el valor 1 para turnos de mañana y el 2 para turnos de tarde. En caso de que un punto tenga ambos turnos, se modelarán como puntos independientes, teniendo que acudir a ellos el mismo día.
- **Prioridades** (P). Número asociado a cada punto de extracción que refleja el grado de prioridad que tiene. Esta relacionado con el tipo de punto de extracción. Así, para hospitales y centros de salud toma el valor 0, para colegios, institutos y universidades, 1 y, para empresas y eventos, el valor 2.

3.3.2. Variables

En el cuadro 3.2 se muestra un resumen de las variables, con su nombre, tipo de dato y número de entradas de cada una. A continuación de la tabla, se describe cada una de ellas.

Constante	Tipo de dato	Entradas
UM	Entero	23440
α	Entero	23440
β	Entero	5860
γ	Entero	293
Extracción	Entero	1

Cuadro 3.2: Datos variables en la fase de optimización

- **Unidad Móvil** (UM). Array tridimensional definido en función del día, del punto de extracción y de cada una de las unidades móviles. Para cada posición describirá el número de bolsas de sangre que cada unidad móvil recoge en cada día y en cada punto de extracción. En la figura 3.5 se puede ver una representación de la estructura de esta variable.

$$UM(d, u, p), \text{ con } \begin{cases} d \in [1, 2, \dots, 31] \\ u \in [1, 2, \dots, U] \\ p \in [1, 2, \dots, PE] \end{cases} \quad (1)$$

dónde PE es el número de puntos de extracción, U es el número de unidades móviles —cada una con capacidad C —, y d es el día del mes en el que se encuentra.

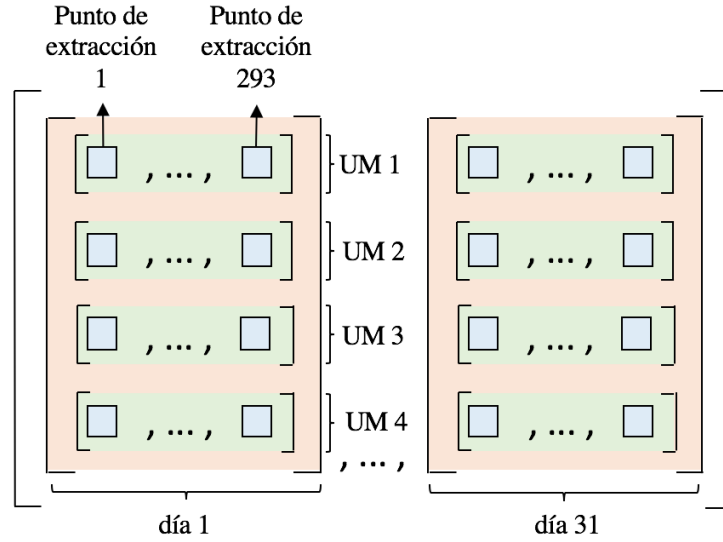


Figura 3.5: Diagrama de la estructura de la variable Unidad Móvil, donde $UM i$ representa cada una de ellas

- **Alfa** (α). Array tridimensional definido también en función del día, el punto de extracción y de las unidades móviles. Es una variable de control binaria de modo que únicamente puede tomar valores 0 ó 1 en función de los valores de la variable UM anterior. Si una unidad móvil ha ido a un punto de extracción un determinado día, dicha posición valdrá 1, si no, 0. Su estructura sería igual que la que describe la figura 3.5.

$$\alpha(d, u, p) \in [0, 1], \text{ con } \begin{cases} d \in [1, 2, \dots, 31] \\ u \in [1, 2, \dots, U] \\ p \in [1, 2, \dots, PE] \end{cases} \quad (2)$$

dónde PE es el número de puntos de extracción, U es el número de unidades móviles y d es el día del mes en el que se encuentra.

- **Beta** (β). Array bidimensional definido en función del día y de los puntos de extracción. Al igual que α , solo puede tomar valores 0 ó 1. En este caso, con que cualquiera de las cuatro unidades móviles disponibles visite un punto de extracción un determinado día, la posición correspondiente tomará el valor 1, por lo que dicho punto no se podrá volver a visitar ese mes.

$$\beta(d, p) \in [0, 1], \text{ con } \begin{cases} d \in [1, 2, \dots, 31] \\ p \in [1, 2, \dots, PE] \end{cases} \quad (3)$$

dónde PE es el número de puntos de extracción y d es el día del mes en el que se encuentra.

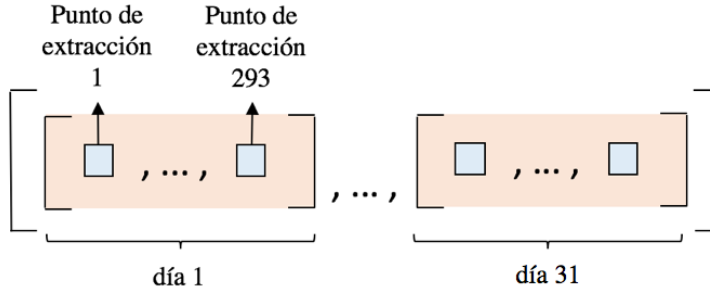


Figura 3.6: Diagrama de la estructura de la variable β

- **Gamma** (γ). Array binario unidimensional definido en función de los puntos de extracción. Si, para un mes determinado, se visita cualquier punto de extracción, la posición asociada a dicho punto tomará el valor 1. El objetivo de esta variable es tener controlado qué puntos de extracción se visitan y qué puntos no, bloqueando que se pueda seleccionar de nuevo el mismo mes.

$$\gamma(d) \in [0, 1], \text{ con } d \in [1, 2, \dots, 31] \quad (4)$$

- **Extracción**. Por último, de cara a poder controlar cuántas bolsas de sangre se recogen diariamente, se crea la variable Extracción (E). Esta se define como la suma de todas las bolsas de sangre recogidas en un día concreto, para todas las unidades móviles utilizadas y para todos los puntos de extracción visitados. Esta unidad aproximará la cantidad recogida a la variable objetivo del optimizador.

$$Extracción(d) = \sum_u \sum_p UM[d, u, p], \text{ con } d \in [1, 2, \dots, 31] \quad (5)$$

3.3.3. Restricciones

A continuación se detallan las restricciones que se han tenido en cuenta para el desarrollo de la herramienta. En primer lugar se presenta una tabla resumen con una breve descripción de cada una para, a continuación, proceder a su formulación y explicación con un mayor grado de detalle.

Las restricciones se han descrito en función de las constantes y variables formuladas anteriormente. Los símbolos utilizados para las variables pueden consultarse en la tabla 3.2 y los utilizados para las constantes en la tabla 3.1.

Cabe recordar que, dentro de las variables establecidas para el desarrollo de la herramienta, será UM la que almacene la cantidad de bolsas de sangre a extraer, para cada unidad móvil, día y punto de extracción. Aparecerán también reflejadas en las restricciones α , β y γ que, a pesar de ser variables, no almacenan ningún valor. Son simplemente variables de control que bloquean y desbloquean distintas posiciones y valores de la variable UM .

Ec. ref.	Descripción
6	Las unidades móviles solo podrán acudir a donde se haya ido en el pasado
7	Las unidades móviles solo pueden estar en un único punto de forma simultánea
8	Las unidades móviles solo pueden acudir a un punto por día
9	No se debe superar la cantidad marcada por el historial de donaciones
10	La cantidad recogida será como máximo el historial más el error de estimación
11	La cantidad recogida será como mínimo el historial menos el error de estimación
12	La cantidad máxima no podrá sobrepasar la capacidad de la unidad móvil
13	Si se visita un punto de extracción, β toma el valor 1
14	Cada día laborable se deben visitar al menos dos puntos de extracción diferentes
15	Si se visita un punto de extracción, γ toma el valor 1 para un mes dado
16	Todos los centros de salud deben ser visitados si estuviesen disponibles
17	Se debe recoger como mínimo una cierta cantidad por punto de extracción
18	No habrá extracciones para los días festivos ni fines de semana
19	Las extracciones en centros educativos deben suponer un 10 % del total
20	Para los meses de verano los centros educativos deben suponer un 5 % del total
21	Los puntos de extracción que no lleguen a la cantidad mínima serán descartados
22	Debe haber al menos dos salidas en turno de mañana
23	Si un punto tiene turno de mañana y tarde se visitará el mismo día

Cuadro 3.3: Restricciones del modelo

- Restricción 1. Para aquellos puntos de extracción p donde el historial de donaciones marque que nunca fue visitado en dicho mes en años anteriores, se fuerza a la variable α a 0. De este modo las unidades móviles no puedan acudir a dicho punto a realizar extracciones.

$$\sum_d \sum_u \alpha[d, u, p] = 0 \quad (6)$$

$$\forall p \in PE : DP[p, m] = 0$$

- Restricción 2. Las unidades móviles solo pueden acudir a un punto de extracción p de manera simultánea.

$$\sum_p \alpha[d, u, p] \leq 1 \quad (7)$$

$$\forall d \in D$$

$$\forall u \in U$$

- Restricción 3. Las unidades móviles solo pueden ir a un punto de extracción p por día.

$$\sum_d \alpha[d, u, p] \leq 1 \quad (8)$$

$$\forall u \in U$$

$$\forall p \in PE$$

- Restricción 4. La cantidad de bolsas de sangre que se puede obtener para cada punto de extracción p por mes m no superará la cantidad reflejada en la base de datos más la desviación típica añadida.

$$\sum_d \sum_u UM[d, u, p] \leq (DP[p, m] + \sigma_{dp}[p, m]) \quad (9)$$

$$\forall p \in PE : DP[p, m] \neq 0$$

- Restricción 5. Cuando una unidad móvil u vaya a un punto de extracción p , el valor de la variable α valdrá 1. El valor que tome la variable UM tomará como limite superior la variación máxima que ofrece su desviación típica más el valor del registro histórico. Como limite inferior la variación máxima que ofrece su desviación típica menos el valor del registro histórico. Además, se añade el factor de días laborables y no laborables para que, en caso de ser festivo, no se realicen extracciones.

$$UM[d, u, p] \geq (DP[p, m] \pm \sigma_{dp}[p, m]) \cdot \alpha[d, u, p] \cdot DL[m, d] \quad (10)$$

$$\forall d \in D \quad (11)$$

$$\forall u \in U$$

$$\forall p \in PE$$

- Restricción 6. Esta restricción funciona en paralelo con la anterior. Cuando una unidad móvil u acude a un punto de extracción p , pone el valor de la variable α a 1, limitando también la cantidad máxima de bolsas de sangre a recoger a la capacidad máxima de la unidad móvil. La idea es que si la cantidad de bolsas de sangre que aparece en el historial es menor que la capacidad de la unidad móvil, sea esta primera quién limite la cantidad de bolsas recogidas y, en el caso de que la capacidad sea menor, sea esta última la que limite.

$$UM[d, u, p] \leq DL[m, d] \cdot \alpha[d, u, p] \cdot C[u] \quad (12)$$

$$\forall d \in D$$

$$\forall u \in U$$

$$\forall p \in PE$$

- Restricción 7. La variable β tomará en valor 1 en caso de que cualquiera de las cuatro unidades móviles u visite un punto de extracción p en cualquiera de los días laborables. Ese punto de extracción quedará bloqueado para el optimizador y no será elegible de nuevo en ese mes.

$$\begin{aligned}\beta[d, p] &= \sum_u DL[m, d] \cdot \alpha[d, u, p] \\ \forall d \in D \\ \forall p \in PE\end{aligned}\tag{13}$$

- Restricción 8. Cada día laborable se deben visitar, al menos, dos puntos de extracción p diferentes.

$$\begin{aligned}\sum_p \beta[d, p] &\geq 2 \\ \forall d \in D : DL[m, d] &\neq 0\end{aligned}\tag{14}$$

- Restricción 9. La variable γ tomará el valor 1 si el punto de extracción p ha sido visitado a lo largo del mes en los días laborables.

$$\begin{aligned}\sum_d \sum_u DL[m, d] \cdot \gamma[p] &= \alpha[d, u, p] \\ \forall p \in PE\end{aligned}\tag{15}$$

- Restricción 10. Todos los hospitales, centros de salud y ambulatorios deben ser visitados de manera obligatoria en caso de que el historial refleje que están por encima de la cantidad mínima $Cmin$.

$$\begin{aligned}\sum_d \sum_u \alpha[d, u, p] &\geq 1 \\ \forall p \in PE : P[p] = 0 \wedge DP[p, m] &\geq Cmin \\ \forall d \in D : DL[m, d] &\geq 1\end{aligned}\tag{16}$$

- Restricción 11. Las unidades móviles u deben transportar, al menos, la cantidad mínima $Cmin$ de bolsas de sangre fijada por el centro que, en este trabajo, será de 20 unidades.

$$\begin{aligned}UM[d, u, p] &\leq DL[m, d] \cdot \alpha[d, u, p] \cdot C[u] \\ \forall d \in D \\ \forall u \in U \\ \forall p \in PE : (DP[p, m] + \sigma_{dp}[p, m]) &\geq Cmin\end{aligned}\tag{17}$$

- Restricción 12. Para todos los días festivos o fines de semana, no habrá extracciones.

$$\begin{aligned}
 UM[d, u, p] &= 0 \\
 \forall u &\in U \\
 \forall p &\in PE \\
 \forall d \in D : DL[m, d] &= 0
 \end{aligned} \tag{18}$$

- Restricción 13. Los puntos de extracción p relativos a centros educativos tienen que tener, para los meses lectivos, una proporción de al menos 10 %.

$$\begin{aligned}
 UM[d, u, p*] &\geq \sum_d \sum_u \sum_p P1 \cdot UM[d, u, p] \\
 \forall m \notin MV \quad \forall p \in PE : T[p] &= 1
 \end{aligned} \tag{19}$$

- Restricción 14. Para los meses de verano MV , estos puntos de extracción tendrán una proporción distinta a la anterior. Dependerá de en que mes se realice la planificación. Para junio, julio y septiembre la proporción será un 5 %, mientras que para agosto se eliminará esta restricción.

$$\begin{aligned}
 UM[d, u, p*] &\geq \sum_d \sum_u \sum_p P2 \cdot DD \cdot UM[d, u, p] \\
 \forall m \in MV \quad \forall p \in PE : T[p] &= 1
 \end{aligned} \tag{20}$$

- Restricción 15 Todos aquellos puntos de extracción p que no lleguen a la cantidad mínima $Cmin$ serán descartadas.

$$\begin{aligned}
 UM[d, u, p] &= 0 \\
 \forall d &\in D \\
 \forall u &\in U \\
 \forall p \in PE : (DP[p, m] + \sigma_{dp}[p, m]) &\leq Cmin
 \end{aligned} \tag{21}$$

- Restricción 16. Debe haber, al menos, dos salidas en el turno de mañana.

$$\begin{aligned}
 \sum_p \sum_u \alpha &\geq 2 \\
 \forall d \in D : DL[m, d] &= 1 \\
 \forall p \in PE : T[p] &= 1
 \end{aligned} \tag{22}$$

- Restricción 17. Esta última restricción está pensada para todos aquellos puntos de extracción que tienen turnos de mañana y tarde. En el caso de que la visita de mañana y de tarde superen la cantidad mínima establecida para el mes en cuestión (C_{min}) y, si la herramienta decide que ambos identificadores deben ser visitados, se deberá acudir a ellos el mismo día —en el caso de que haya un punto de extracción en el que se haya acudido tanto de mañana como de tarde, la herramienta modela los turnos como puntos de extracción independientes—. La siguiente ecuación muestra un modelo genérico, donde X1 y X2 se deberán sustituir por los puntos de extracción correspondientes (por ejemplo, “Lorca - Mañana” y “Lorca - Tarde”).

$$\sum_u \alpha[d, u, X1] = \sum_u \alpha[d, u, X2] \quad (23)$$

$$\forall d \in D : DL[m, d] = 1$$

3.3.4. Función Objetivo

La función objetivo es el punto clave desde donde parte el problema de optimización. La misión general de la herramienta es, cumpliendo con las restricciones planteadas, satisfacer la ecuación que rige a la función objetivo. La idea es tratar de establecer un valor fijo de bolsas de sangre diarias, de modo que la función objetivo tratará de minimizar la diferencia que exista entre la cantidad recogida cada día y la cantidad ideal para ese día.

$$\min_{\forall d} \sum_d |E[d] - DD \cdot V[m][d]| \quad (24)$$

donde se recuerda que E es la variable Extracción. Esta es la suma de todas las bolsas de sangre extraídas por las unidades móviles para un día determinado. V sirve para indicar si el día concreto es víspera de festivo o no. En caso de que lo sea, la demanda diaria de bolsas de sangre (DD) aumentará un 5 %.

3.4. Postprocesado y representación de resultados

Esta es la última fase del proyecto en la que se procesará la solución obtenida en la optimización anterior. La idea general es, en base a los resultados obtenidos, crear un fichero *.ics* que permita visualizar la solución a modo de calendario, siendo así más visual e intuitiva.

El punto de partida es el archivo CSV que se genera tras cada optimización. Este archivo, generado gracias a un *script* en el código, contiene los datos de la variable UM, es decir, a qué puntos de extracción y qué días acude cada una de las unidades móviles. El primer paso para modelar el calendario será crear objetos con

los datos de la variable UM, de una forma muy similar a la que realizamos en la fase de modelado de datos. El archivo CSV esta formado por múltiples líneas en formato de texto separado por comas, donde cada unidad móvil y día vienen delimitados por corchetes. Se recorrerá cada una de esas líneas buscando los valores distintos de cero que representen las bolsas extraídas y, en función del número de corchetes leídos hasta encontrar ese valor distinto de cero, se asignará la cantidad a un día y unidad móvil determinada.

El objetivo principal de esta fase, como se ha mencionado ya, es la creación de un calendario. Para ello, dentro del código que realiza la lectura de los resultados, se crea un fichero de texto con dichos resultados almacenados en formato *.ics*. Los archivos *.ics* tienen un formato estándar del que completamos únicamente los campos relevantes para el trabajo. Estos son:

- **Nombre del evento.** El nombre del evento estará compuesto, en primer lugar, del código que tuviese asignado el punto de extracción, a modo de identificación. Seguido de este, se añade el nombre del punto de extracción.
- **Hora de inicio y fin del evento.** Se ha establecido de manera genérica que los puntos de extracción que tuviesen asignado el horario de mañana comiencen a las 10 horas y los puntos de extracción con horario vespertino comiencen a las 16 horas.
- **Localización.** Ubicación del punto de extracción dentro de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. Se trata de un elemento interactivo con enlace directo a la ubicación seleccionada, permitiendo acceder a su posición en un mapa.
- **Descripción.** Se indica qué unidad móvil acudirá a la extracción junto a la cantidad de bolsas de sangre que se espera obtener de ella. Además, se incluye una estimación de la previsión de donantes que acudirán en base a los datos obtenidos del proceso de modelado. Esta estimación se incluye por temas logísticos del centro (cálculo de comida y bebida principalmente).

Se mostrarán ejemplos de estas representaciones en el capítulo 5 de Resultados.

CAPÍTULO 4

Herramientas e implementación

La metodología descrita en el capítulo 3 ha sido probada con datos reales obtenidos entre los años 2007 y 2017 en la Región de Murcia. Estos datos han sido facilitados por el Centro Regional de Hemodonación con el objetivo de tener un control estadístico de las extracciones realizadas en cada colecta, para así, posteriormente, poder planificar con mayor precisión las campañas de donación de sangre venideras.

En este capítulo se procederá a la descripción de las herramientas utilizadas para el distinto tratamiento de los datos anteriores, así como a la explicación y al análisis de la base de datos proporcionada.

4.1. Herramientas

El proyecto se ha dividido en cuatro fases diferentes. Para cada una de ellas, se han utilizado las herramientas que a continuación se describen para conseguir alcanzar los objetivos de los que se compone el trabajo. En la figura 4.1 se puede ver un diagrama con las distintas fases que componen el trabajo así como las herramientas empleadas en cada una de ellas.

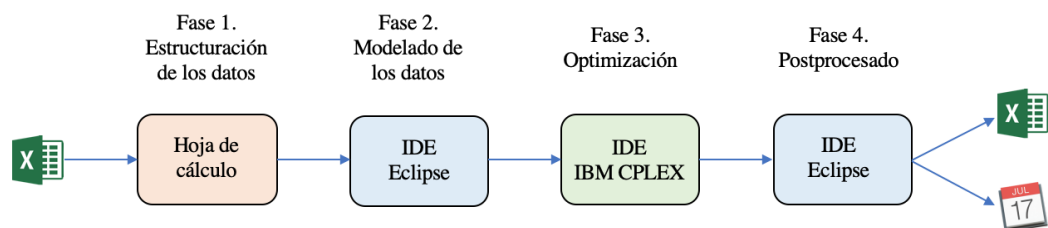


Figura 4.1: Representación de las distintas fases de las que se compone el proyecto junto a la herramienta empleada en cada una de ellas

1. En la primera fase, cuando los datos son recibidos en hojas de cálculo, se estructuran y seleccionan las variables de interés, y se *limpian* los datos de

errores y datos perdidos.

2. La programación llevada a cabo en la segunda y la cuarta fase, correspondiente al modelado y postprocesado de datos, se ha realizado en el lenguaje de programación Java, usando el IDE Eclipse.
3. El proceso de optimización de la tercera fase se realiza en OPL (Optimization Programming Language), que es un lenguaje de programación matemática de modelado para optimización combinatoria. Se usa el IDE IBM ILOG CPLEX, que por su importancia para el proyecto, se describe a continuación.

4.1.1. IBM ILOG CPLEX Optimization Studio

IBM ILOG CPLEX Optimization Studio¹ es un paquete software de programación matemática capaz de resolver problemas de optimización entera y lineal con un volumen muy elevado de datos. Para ello, utiliza variantes del método *SIMPLEX*² y del método de punto interior, problemas de programación cuadráticos convexos y no convexos y problemas de restricción cuadrática. Además, Se puede enlazar como motor de optimización externo a *scripts* desarrollados en otros lenguajes como Java, C++, C#, Phyton, Matlab e incluso con hojas de cálculo.

CPLEX no es un lenguaje de programación orientado a objetos. Un proyecto en CPLEX consta de cuatro archivos: (i) modelo, (ii) datos, (iii) configuración de ejecución, y (iv) configuración de proyecto. En los siguientes párrafos se describen brevemente cada uno de ellos.

Modelo: fichero .mod

Es el fichero principal donde se escribe el programa. Este fichero, a su vez, se estructura en cinco partes:

1. **Definición de constantes.** Conjunto de datos de entrada en los que el sistema se va a basar para calcular la solución. Muchas veces el volumen de datos es muy elevado, por lo que éstos no están directamente definidos en este archivo. Para ello, existe la importación desde los ficheros *.dat* —se describirá a continuación—, cargándose automáticamente su valor. Para el desarrollo de la herramienta las constantes se describieron según indica el apartado 3.3.1.
2. **Declaración y definición de variables.** Declaración del conjunto de parámetros sobre los que el programa deberá alcanzar un valor óptimo, como por ejemplo, el número de bolsas de sangre que debe recoger cada unidad móvil en cada punto de extracción cada día. La definición de variables de la herramienta se encuentra descrita en el apartado 3.3.2.

¹<https://www.ibm.com/es-es/products/ilog-cplex-optimization-studio> Última visita: 3/06/2019

²El método Simplex es un procedimiento iterativo que permite mejorar la solución de la función objetivo en cada paso. El proceso concluye cuando no es posible continuar mejorando dicho valor, *i.e.*, se ha alcanzado la solución óptima (solución que minimiza o maximiza una métrica y que se satisface todas las restricciones).

3. **Función objetivo.** Ecuación a optimizar teniendo en cuenta los datos de entrada y las restricciones planteadas. Del mismo modo que las constantes y variables, la función objetivo utilizada para la herramienta está detallada en el apartado 3.3.4.
4. **Definición de restricciones.** Conjunto de restricciones que tiene que cumplir la solución objetivo. Es necesario que satisfaga todas ellas, ya que de lo contrario el programa categorizará a la solución como inalcanzable. En ese caso se deberán replantear las restricciones para conseguir modificar ese bloqueo. Las restricciones utilizadas para la optimización se pueden consultar en el apartado 3.3.3.
5. **Scripts.** Pequeños fragmentos de código utilizados para exportar la solución optimizada o imprimir las soluciones por pantalla.

Datos: fichero .dat

Conjunto de todos los datos de entrada que utilizará el programa para optimizar la solución. El objetivo principal de tener un fichero paralelo al *.mod* es poder manipular los datos de una forma más sencilla, dándole mayor legibilidad al código. De esta forma, si queremos modificar algún parámetro de entrada, no es necesario modificar el archivo de modelado (*.mod*).

Configuración de ejecución

Contiene la configuración seleccionada para ejecutar el modelo. En la figura 4.2 se puede ver una representación de las distintas partes que componen un proyecto en CPLEX, así como la relación entre las mismas.

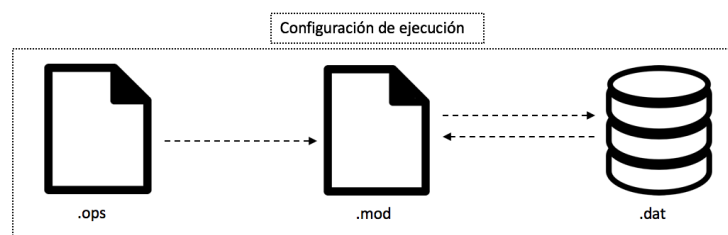


Figura 4.2: Representación de las distintas partes que componen un proyecto en CPLEX, así como la interacción entre las mismas

La interfaz gráfica del programa CPLEX proporciona distintas ventanas donde poder observar parámetros relativos al proceso de optimización. Se pueden ver los conflictos entre distintas restricciones que hacen que no se alcance una solución objetivo, una gráfica del tiempo que se tarda en alcanzar la solución, o los problemas de ejecución que pudiesen surgir, entre muchos otros parámetros.

Configuración de proyecto: fichero .ops

Ventana destinada a la configuración de parámetros relativos al proyecto donde se pueden escoger diferentes características, como la memoria disponible para la ejecución o el tiempo máximo de cómputo.

La principal razón por la que se ha escogido IBM ILOG CPLEX Optimziation Studio ha sido por su popularidad y uso. Permite además la paralelización de la computación en distintos servidores y el acceso directo a bases de datos. Su uso en la industria está muy extendido y es utilizado desde 1988³.

4.2. Preprocesado de los datos de entrada

Desde el Centro Regional de Hemodonación de Murcia se ha facilitado una base de datos anonimizada con el conjunto de todas las colectas realizadas en la Región entre los años 2007 y 2017. El archivo es una hoja de cálculo que cuenta con un total de 14.952 entradas, siendo cada una de ellas una colecta llevada a cabo en este periodo de tiempo. La información proporcionada por el centro ha sido:

- Código del punto de extracción
- Nombre del punto de extracción
- Tipo de punto de extracción
- Distancia (*módulo*)
- Fecha de la colecta
- Turno de la colecta (mañana o tarde)
- Personal necesario
- Previsión de la cantidad de personas que se presentarían ese día
- Cantidad de personas que finalmente se presentaron ese día
- Cantidad de extracciones realizadas ese día

Aunque a priori pueda parecer que la cantidad de personas que se presentaron y la cantidad de extracciones realizadas deba ser la misma, la realidad es totalmente diferente. Muchas veces se rechaza al donante al no cumplir con los requisitos exigidos (edades mínima y máxima, peso mínimo, estado óptimo de salud, *etc.*).

Se considera un punto de extracción a todo aquel lugar en el que se ha producido una campaña de recolección de sangre. La naturaleza de los mismos es muy variada: desde institutos y universidades hasta centros de salud, pasando por eventos deportivos y empresas. Estos puntos están distribuidos a lo largo de toda la

³<https://en.wikipedia.org/wiki/CPLEX> . Última visita: 15/06/2019

geografía de la comunidad autónoma en distintos módulos en función de la distancia al CRH ya que, al tratarse de un servicio público, se garantiza, en la medida de lo posible, el derecho a donar sangre a todo el mundo.

El código de cada punto de extracción es un identificador interno que usa el Centro para identificar cada punto de manera inequívoca. De manera general, a cada punto de extracción se acude siempre en un horario de mañana o de tarde (turno). Un punto de extracción al que se pueda acudir por las mañanas o por las tardes tiene doble código. Si esto sucede, se consideraría cada uno como un punto de extracción independiente en los cálculos.

Como la herramienta se va a encargar de la planificación de las colectas de manera mensual, la utilidad de la base de datos es nula si no se organizan las entradas en función del mes en el que se realiza la extracción. Por lo tanto, para conseguir trabajar adecuadamente, se ha procedido a ordenar el conjunto de todas las entradas por punto de extracción y mes, independientemente del año. Se ha tomado para cada periodo y punto de extracción la media de los siguientes datos: personas estimadas, personas finalmente presentadas y extracciones realizadas. Además, para tener en cuenta la dispersión de los datos, se ha añadido la desviación típica de cada mes.

Después de este proceso, los datos constan de 293 entradas que se corresponden con cada uno de los puntos de extracción donde se han realizado colectas en los últimos años. La información para cada entrada está ordenada de manera mensual, de forma que, por punto de extracción y mes tenemos la siguiente información:

- Media de la previsión de donantes
- Desviación estándar de la previsión de donantes
- Media de las personas presentadas
- Desviación estándar de las personas presentadas
- Media de las extracciones realizadas
- Desviación estándar de las extracciones realizadas

Después de realizar este proceso de organización, los datos están listos para poder utilizarlos en la siguiente fase.

4.3. Análisis de los datos de entrada

Se ha procedido al análisis de los datos de entrada para comprobar su distribución y características. Tras este análisis se han podido sacar conclusiones relevantes que pueden afectar a la herramienta en sus diferentes ámbitos, como la variación de los ofrecimientos para los diferentes meses del año, como se verá en el capítulo 5 de Resultados.

En la figura 4.3 se pueden ver representados la totalidad de los datos de entrada de los que se dispone (previsión de donantes, donantes presentados y extracciones realizadas).

Se presenta la media por meses de cada una de las tres variables. Como se puede observar, los datos se comportan de manera similar para todos los meses. El número de donantes previstos por el centro es, en todos los casos, mayor a los donantes finalmente presentados. Este hecho puede conllevar un desaprovechamiento de los recursos ya que, en base a la previsión de donantes, se decide el tipo de vehículo a enviar al punto de extracción, la cantidad de personal (tanto médico como administrativo), e incluso la cantidad de comida a preparar para los donantes.

Por otro lado, también se puede apreciar como la cantidad final de extracciones es, para todos los casos, inferior a las personas presentadas. Este rechazo se produce por diversas causas (fisiológicas, estado de salud, periodicidad de donaciones realizadas, *etc.*).

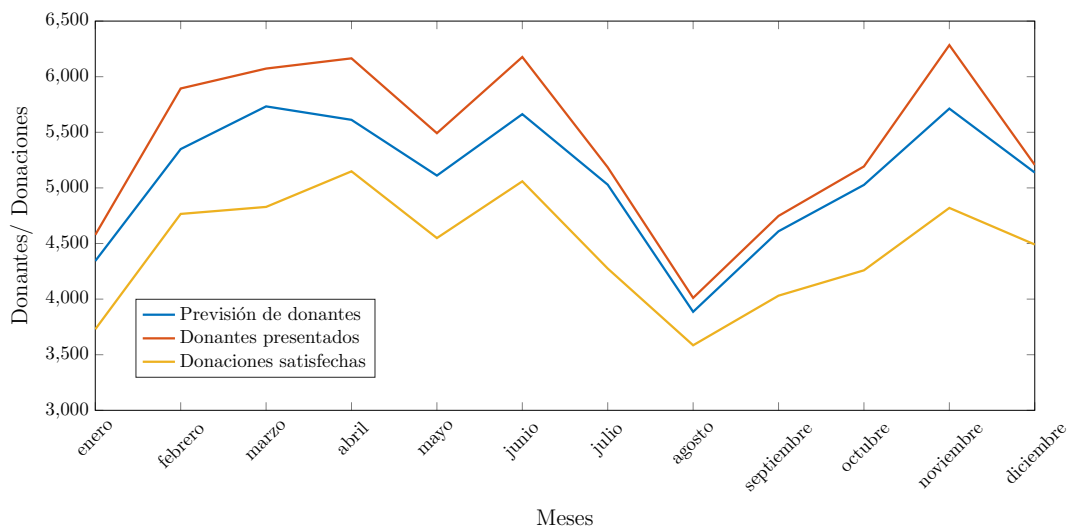


Figura 4.3: Representación gráfica de los datos de entrada, clasificados por tipo de dato y mes disponible para el total de todas las entradas

Cabe destacar también la enorme diferencia existente entre los meses de calor y frío. Para agosto el total de donaciones se sitúa en torno a 4.000, sin embargo, para abril sube hasta las 5.000. Esto se traduce en una diferencia media de 50 bolsas de sangre al día. No obstante, la herramienta desarrollada en el presenta trabajo selecciona aquellos centros que tienden a estabilizar durante todo el año, en la medida de lo posible, esta diferencia existente.

Como se puede apreciar, las métricas son muy distantes entre sí. Existe un error medio del 6 % entre la previsión de personas que realizó el centro y las que finalmente se presentaron — con una desviación estándar del 3 %—. Por otro lado, el error medio entre las personas presentadas y las donaciones es del 17 % —con una desviación estándar del 3 % también—. Estos errores alcanzan su pico en el mes de marzo y noviembre, con valores de 9 % y 16 % respectivamente. La herramienta desarrollada, como se verá en el capítulo 5 de Resultados, minimiza, en la medida

de lo posible, este error, ajustando oferta y demanda en todo momento.

Otro aspecto importante a comprobar es la cantidad media de bolsas de sangre disponible en los puntos de extracción para cada mes. En la figura 4.4 se puede ver una comparativa entre el número de extracciones medias por mes y la cantidad objetivo deseada (línea horizontal). Para el cálculo del primero se han tenido en cuenta solamente los días laborables.

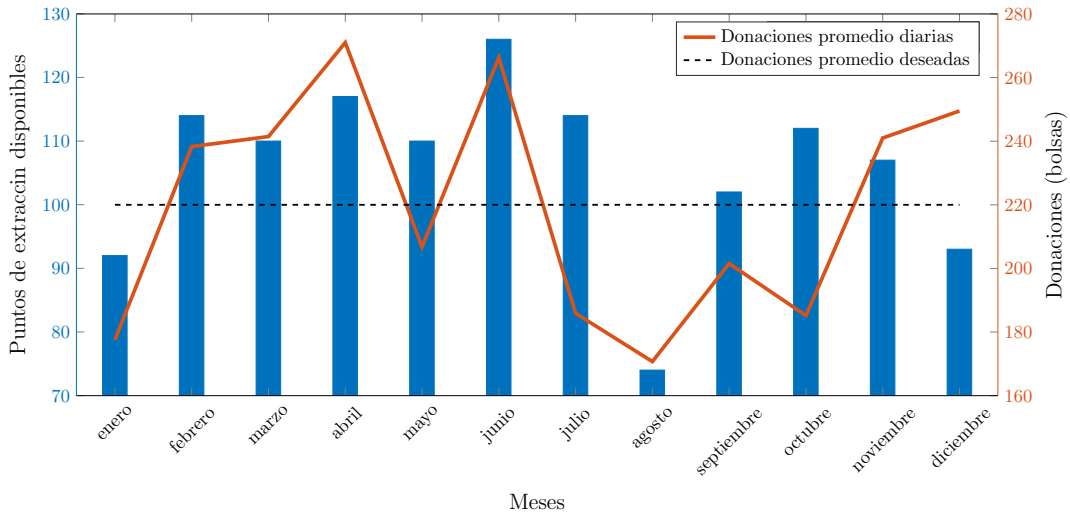


Figura 4.4: Comparativa entre los puntos de extracción disponibles y el número de medio de bolsas de sangre extraídas, para cada mes

Antes de pasar al análisis y presentación de los resultados, cabe destacar que, en base a la figura, se puede comprobar como seis de los doce meses cumplen con una media superior a la cantidad objetivo de bolsas fijadas por el Centro de Hemodonación (febrero, marzo, abril, junio, noviembre y diciembre). Por otro lado, dos se quedan muy cerca de cumplirlo (mayo y septiembre) y cuatro bastante alejados (enero, julio, agosto y octubre). La cantidad de bolsas fijada por el centro, tal y como se explicará en el capítulo 5 de Resultados, son 220 diarias. En la figura 4.4 viene representado como la línea discontinua de color negro.

CAPÍTULO 5

Resultados

En este capítulo se presenta, (i) por un lado, el rendimiento del proceso de optimización, con el análisis de parámetros relativos al mismo; y (ii) por otro, los resultados de la metodología aplicada para la resolución de los problemas que plantea el proyecto.

5.1. Rendimiento de optimización

Para la obtención de resultados se ha procedido a la manipulación de los datos de entrada con el programa IBM ILOG CPLEX Optimization Studio, ya comentado en el apartado de herramientas del capítulo 4. Se ha realizado, para cada uno de los meses y de forma independiente, un modelo con las restricciones formuladas en el capítulo 3, con el objetivo de alcanzar la función objetivo en base a los datos de entrada. Los resultados se comentarán en el siguiente apartado, no obstante, cabe destacar en este algunos parámetros relevantes a la optimización.

Uno de los parámetros en los que mayor variación ha habido durante la optimización ha sido el tiempo ejecución. Como se puede ver en la figura 5.1 el tiempo medio ha sido de 90 segundos, con una desviación estándar de 121 segundos. De manera general, el tiempo de ejecución oscila entre medio minuto y dos minutos. Sin embargo, como se puede apreciar, para el mes de febrero existe una diferencia significativa, ya que alcanza los siete minutos. Este hecho explica la desviación tan elevada que hay.

Los tiempos de ejecución se pueden ver también con la figura 5.2, donde cada punto amarillo representa un óptimo local alcanzado en una iteración del modelo y la línea roja la solución óptima global del mismo. En el eje horizontal se representan el tiempo de ejecución y en el vertical el número de soluciones óptimas. Como se puede comprobar en la figura 5.2a, para el mes de agosto se ha encontrado la solución óptima realizando una única iteración. Para el caso de febrero (figura 5.2b), se han tenido que realizar cinco. La herramienta, tras alcanzar una solución, comprueba si hay otra mejor que satisfaga la función objetivo y las restricciones, hasta llegar así al óptimo global. Para el mes de febrero, se aprecia

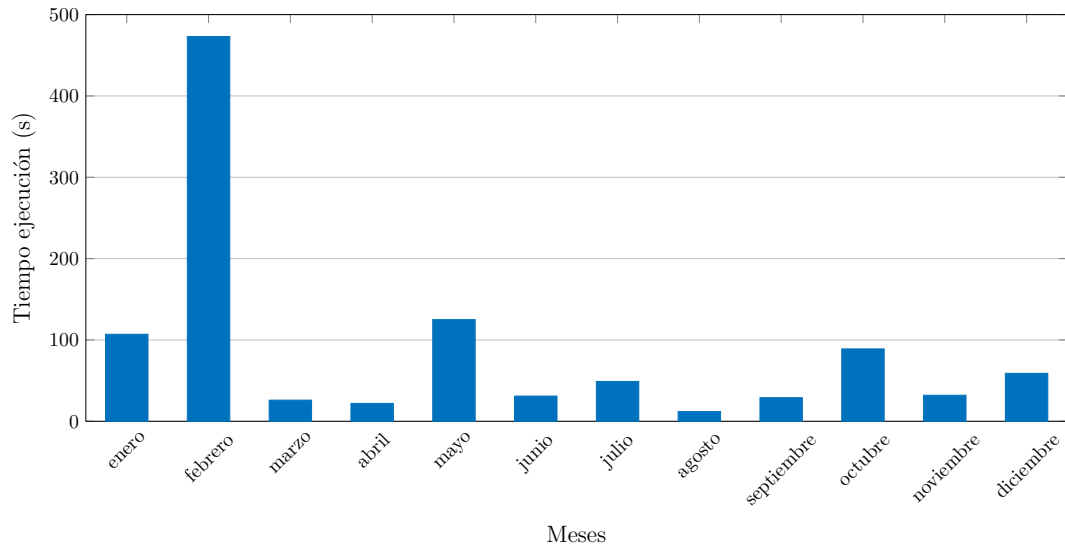


Figura 5.1: Comparativa entre los tiempos de ejecución para la optimización de los resultados de cada mes

como la herramienta alcanza una solución óptima muy cercana a la solución global a los 90 segundos, no obstante, sigue hasta los 500 para encontrar esta última. En futuras mejoras de la herramienta, donde la eficiencia de la optimización sea más compleja por aumentar las restricciones, se recomienda un análisis de convergencia a la solución.

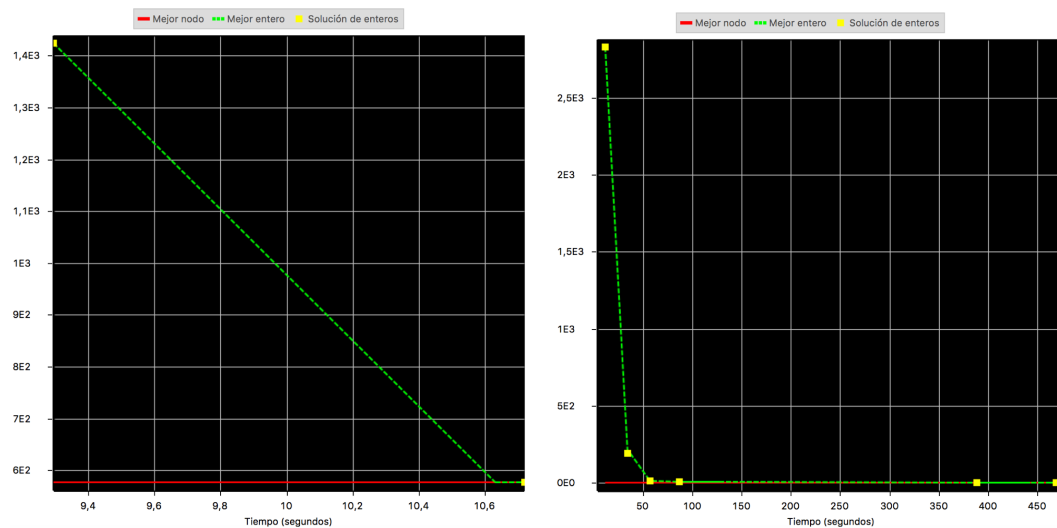


Figura 5.2: Comparativa de tiempos de ejecución para la optimización de los resultados para cada mes. En el eje horizontal se representan el tiempo de ejecución y en el vertical el número de soluciones óptimas

5.2. Resultados

Para la presentación y análisis de los resultados, se muestran las soluciones para los meses de enero y febrero del año 2019 para poder comparar las soluciones con la práctica real llevada a cabo por el centro. Estos dos meses son muestras representativas de los dos casos en los que se pueden clasificar las soluciones:

- **Solución óptima que alcanza la demanda deseada.** En este caso la herramienta consigue que, para cada uno de los días laborables del mes, se consiga el objetivo de bolsas a extraer. Se ha escogido en representación el mes de febrero, pero esta solución se alcanza también para marzo, abril, junio, noviembre y diciembre.
- **Solución óptima que no alcanza la demanda deseada.** La herramienta no consigue encontrar una solución que satisfaga las necesidades de bolsas de sangre extraídas para cada día. Se ha escogido en representación el mes de enero, pero dentro de esta categoría se incluyen también los meses de mayo, julio, agosto, septiembre y octubre.

A continuación se procederá al análisis de estos dos meses, comparando la solución obtenida por la herramienta con la planificación real llevada a cabo por el Centro Regional de Hemodonación en el año 2019. La optimización mono-objetivo tenía como métrica maximizar el número el número de bolsas de sangre a extraer al día con referencia a un número deseado. En este capítulo, además, estudiamos el impacto de la solución en otros parámetros como el coste, distancia recorrida o personal empleado. El estudio de estas métricas nos permitirá: (i) compararnos con la solución actual, (ii) identificar parámetros susceptibles de optimizar, y (iii) aportar información objetiva de gran valor al personal técnico que gestiona las colectas. Se divide el análisis de los resultados en las siguientes secciones:

- Resultado de optimización (5.2.1)
- Análisis de selección de puntos de extracción (5.2.2)
- Análisis de carga de trabajo de personal (5.2.3)
- Análisis de distancia recorrida (5.2.4)
- Análisis de costes (5.2.5)

5.2.1. Resultado de la optimización

El objetivo principal de la herramienta es establecer un número objetivo de bolsas de sangre a extraer. Esta métrica puede variar ligeramente, como se explica a continuación:

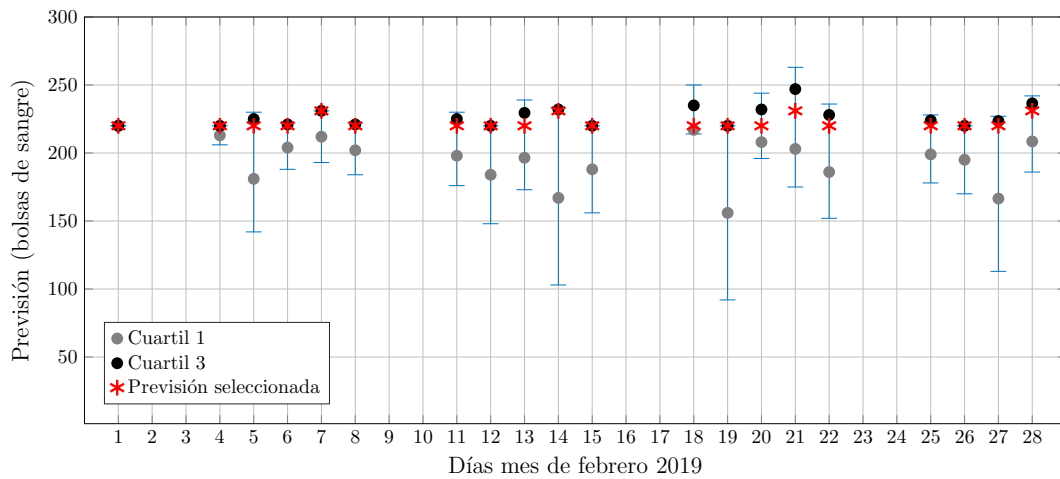
1. No hay ningún criterio objetivo para definir el número de bolsas necesarias. El hecho de establecer una cifra u otra viene determinado por la experiencia personal de la persona que realiza la planificación. Se intentan recoger, de manera general entre 180 y 220 bolsas de sangre para abastecer a los hospitales de la Región de Murcia. Por lo tanto, como punto medio consensuado con el CRH se ha establecido un objetivo de 200 bolsas de sangre diarias.
2. Para el trabajo se ha añadido además una tasa de crecimiento interanual del 10 %. Esto significa que la cantidad objetivo pasa a ser de 220 bolsas de sangre diarias. El centro actualmente es autosuficiente, pero ocurren episodios de alerta de necesidad algunas ocasiones. Este crecimiento permitirá: (i) reducir el número de alertas por insuficiencia de hemoderivados en el banco de sangre y (ii) permitirá incrementar la cartera de nuevos donantes—preferiblemente jóvenes—para que siempre haya personas dentro del sistema de hemodonación.
3. Existe un tercer criterio que puede modificar esta última cifra. Para los días que son víspera de festivo o de fin de semana se incrementa un 5 % la cantidad objetivo, hasta 231 bolsas de sangre. De esta forma se garantiza el suministro de sangre a los hospitales y centros de salud durante los días que no se realizan extracciones.

Para cada uno de los días, la herramienta ha calculado una combinación lineal de las bolsas de sangre que se extrajeron en los distintos puntos de extracción. Además se ha tenido en cuenta la desviación típica (como ya se comentó en el capítulo 3 y 4), de modo que el número de bolsas de sangre por punto no ha sido fijo. Esto significa que se ha dado libertad a la herramienta para seleccionar la cantidad de bolsas de sangre a extraer en cada punto, siempre y cuando se encuentre entre el valor mínimo —determinado por la cantidad del historial menos la desviación— y el valor máximo —determinado por la cantidad del historial más la desviación— (ver restricción 10 y 11). Tampoco pueden superar la capacidad de la unidad móvil correspondiente.

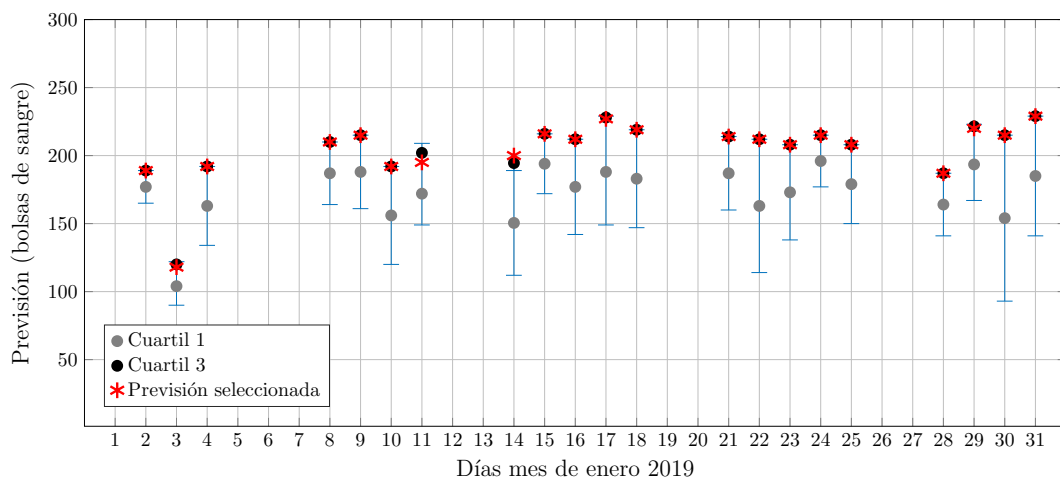
En base a dichas restricciones, la figura 5.3 muestra, para cada día, el valor que se ha escogido de entre los valores disponibles que acabamos de comentar. La raya dentro de la caja de cada uno de los días que aparece en la figura representa el valor seleccionado, siendo los bordes de la caja los límites máximo y mínimo mencionados anteriormente.

En la figura 5.3a, correspondiente al mes de febrero, se puede observar cómo los valores escogidos por la herramienta son valores muy próximos al límite superior, sin llegar a alcanzarlo. Por otro lado, para la figura 5.3b correspondiente al mes de enero, estos valores se alcanzan para prácticamente todos los días. Este hecho explica la razón por la cual no se alcanza una solución óptima para la demanda deseada. En enero, no existen más puntos de extracción que seleccionar, siendo la solución alcanzada por la herramienta la mejor que se puede obtener para las restricciones planteadas.

Como se comentaba, para el mes de febrero —y aquellos que también han alcanzado una solución óptima para la demanda deseada— se ha conseguido cuadrar



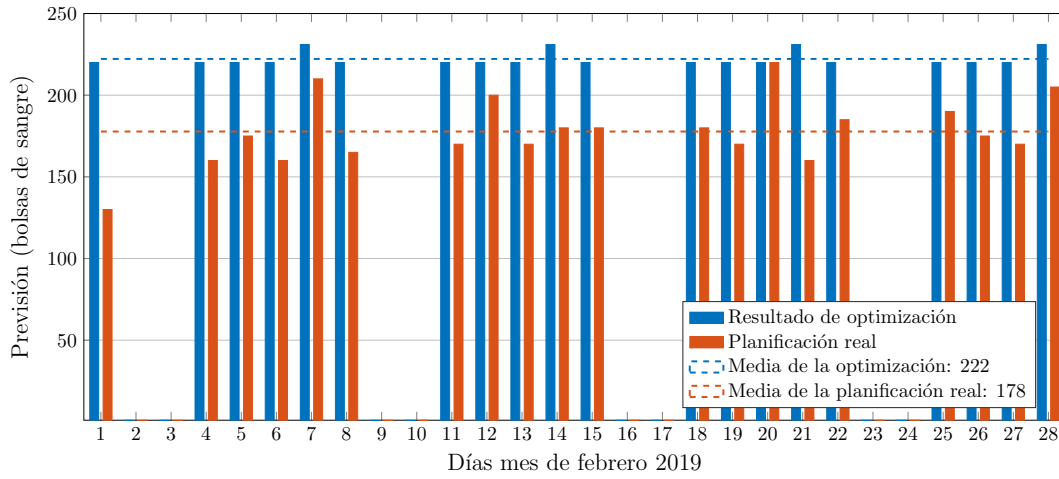
(a) Rango de bolsas de sangre seleccionables por parte de la herramienta para cada día del mes de febrero



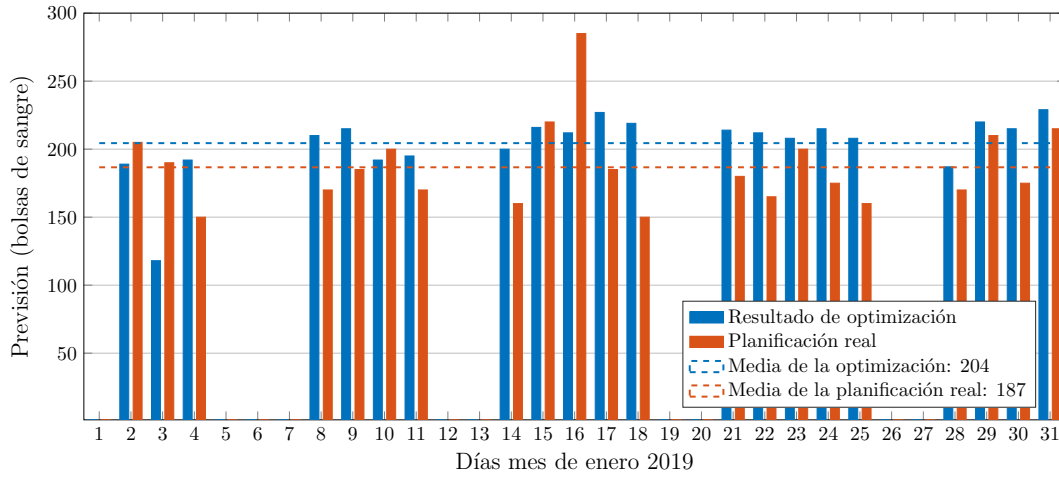
(b) Rango de bolsas de sangre seleccionables por parte de la herramienta para cada día del mes de enero

Figura 5.3: Comparativa de las distintas posibilidades de elección, por parte de la herramienta de optimización, para cada uno de los días que conforman los meses comparados

la solución con el objetivo, obteniendo 220 bolsas para los días laborables a excepción de los que son vísperas, que han alcanzado 231. En la figura 5.4a se muestra una comparativa con el calendario utilizado para el mes de febrero de 2019 podemos observar una clara diferencia. En este último, se obtuvo una media de 177 bolsas por día (previstas), una diferencia de más de 40 bolsas con respecto a la planificación propuesta por la herramienta. Por lo tanto se puede decir que, en base al objetivo principal del trabajo, la optimización obtiene mejores resultados que el calendario real empleado.



(a) Comparativa entre la optimización realizada por la herramienta y la planificación utilizada por el centro, para el número de bolsas de sangre extraídas en el mes de febrero



(b) Comparativa entre la optimización realizada por la herramienta y la planificación utilizada por el centro, para el número de bolsas de sangre extraídas en el mes de enero

Figura 5.4: Comparativa entre la planificación de la herramienta y la manual para las bolsas de sangre extraídas en ambos meses

Para el mes de enero —y aquellos que tampoco han alcanzado una solución óptima para la demanda deseada—, a pesar de que no se haya alcanzado una solución óptima en base a la demanda objetivo, se ha conseguido mejorar las

métricas respecto de la planificación empleada por el centro. Comparando ambos, el calendario propuesto por la herramienta alcanza una media de 205 bolsas por día, mientras que, para el calendario del centro fueron 186 (previstas). En la figura 5.4 se presenta una comparativa entre la cantidad de bolsas de sangre extraídas para el calendario propuesto por la herramienta y el utilizado por el centro.

Se ha alcanzado una precisión del 95,61 %. Para el primer tipo de resultado (solución óptima que alcanza el valor deseado) la precisión es del 100 %, mientras que para el segundo tipo (solución óptima que no alcanza la demanda deseada) es del 89,91 %. Cabe destacar que la planificación llevada a cabo por el Centro Regional de Hemodonación, apenas alcanza una precisión del 80 %.

5.2.2. Análisis de selección de puntos de extracción

Se entiende por puntos de extracción visitados el conjunto de todos los puntos a los que han acudido unidades móviles. Esta métrica, a pesar de no ser un objetivo, es necesario cuantificarla para comprobar qué puntos han sido visitados o no. La razón radica en que, en caso de un punto cumpla con las restricciones planteadas, si no tuviese cabida para el mes cuestión, se podría reubicar para el mes siguiente. En la figura 5.5 se representa la comparativa entre los puntos de extracción visitados y no visitados para el conjunto de todos los meses del año. En la figura, las columnas azules representan la cantidad de puntos de extracción visitados, mientras que las naranjas muestran la cantidad de puntos de extracción que, cumpliendo con las restricciones, se han quedado sin visitar.

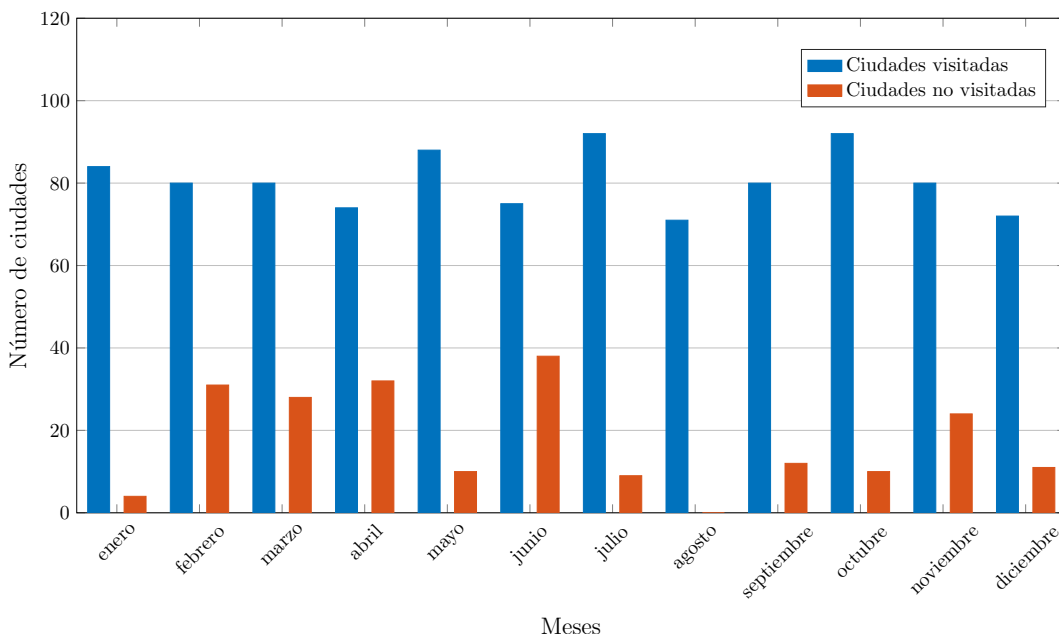


Figura 5.5: Comparativa entre los puntos de extracción visitados y no visitados para cada mes del año

Para enero, el número de puntos de extracción no visitados ha sido cuatro. El hecho de que haya puntos de extracción no visitados y no se haya alcanzado el óptimo significa que, esos cuatro puntos, tenían un cantidad de bolsas de sangre en el histórico menor que los puntos escogidos. Además se han utilizado todas las unidades móviles disponibles de modo que no había cabida para más puntos, de ahí que se excluyeran.

Como se puede comprobar, los meses en los que se han visitado todos (o prácticamente todos) los puntos de extracción se corresponden a los meses de verano. En ellos, no se alcanza una solución óptima. Se puede deducir por tanto que este hecho se debe a una falta de puntos de extracción que cumplan con las restricciones establecidas.

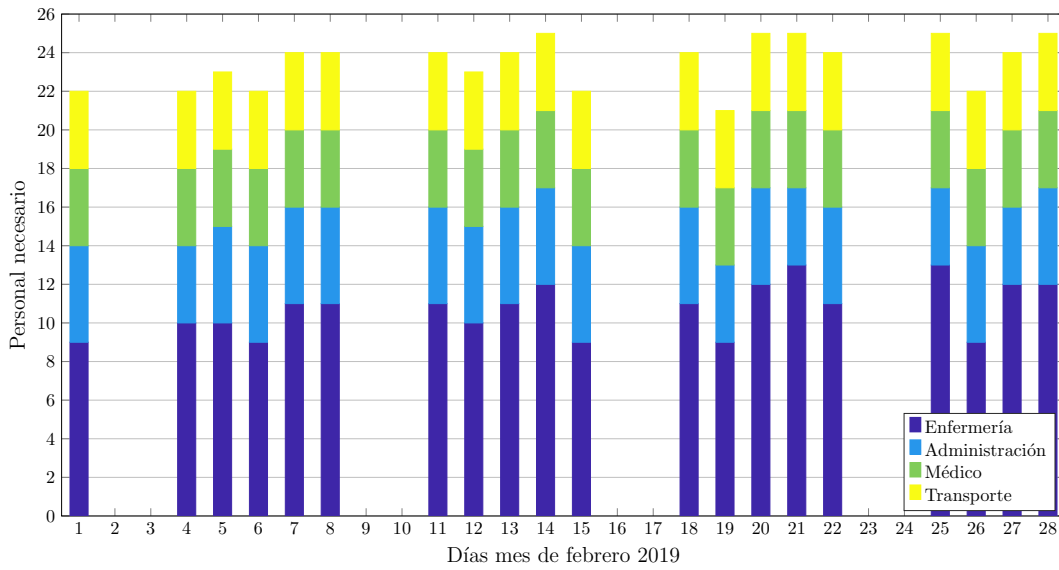
Si comparamos el número de puntos de extracción de la optimización con los del modelo real, podemos ver una diferencia notable. En el caso concreto del mes de febrero se visitan cuatro puntos de extracción por día laborable, haciendo un total de 80 puntos visitados. Para el calendario del centro hay un total de 62, lo que hace una media de 3 puntos visitados al día. Este hecho explica en parte la razón por la que el modelo real no recoge tantas bolsas de sangre como el optimizador, tal y como se comentó en el capítulo 5.2.1.

5.2.3. Análisis de carga de trabajo de personal

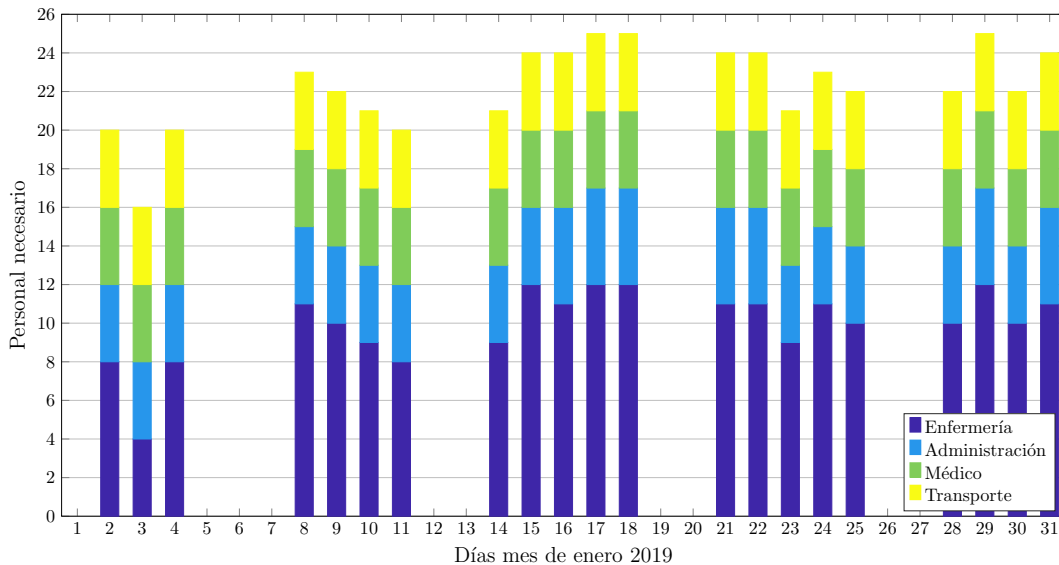
La asignación de personal médico y administrativo dependerá de la previsión de bolsas de sangre a recoger en el punto de extracción. De manera general, siempre irá un médico y un conductor. No obstante, la cantidad de administrativos y de enfermeros varía entre un 20 % y un 25 % en función de las bolsas.

En la figura 5.6 se puede ver una distribución de la cantidad de personal empleado por día para los meses de febrero y enero respectivamente. Como se puede comprobar la cantidad de enfermeros es muy superior a la del resto de personal. Este hecho se debe a la cantidad de bolsas de sangre que se pretende extraer. Aunque para todos los días la optimización determina la cantidad de bolsas de sangre previstas a recoger, la cantidad de personal se calcula a posteriori en función de la previsión y no del día.

El centro cuenta con personal fijo y subcontratado, cobrando este último por distancia. Si realizamos una comparativa, para el mes de febrero, de como se utilizan estos recursos por parte del calendario realizado por la herramienta y el empleado por el centro, se puede ver cómo la herramienta de optimización utiliza más porcentaje de ellos que la planificación real: un 87,0 % frente a un 70,2 %. La razón vuelve a ser la misma que para los casos anteriores, al haber mayor cantidad de bolsas a extraer y más ciudades que visitar, se necesita más personal.



(a) Cantidad de personal empleado por día para el total de las extracciones realizadas en febrero



(b) Cantidad de personal empleado por día para el total de las extracciones realizadas en enero

Figura 5.6: Comparativa de la cantidad de personal empleado por día para el total de las extracciones realizadas en cada mes

Como se puede comprobar en la figura 5.7, en enero, para los enfermeros y administrativos el porcentaje de utilización de los recursos es muy parejo, mientras que el de los conductores y médicos se mantiene igual. La razón fundamental es que en estos últimos, se emplea uno por punto de extracción y, al proponer la herramienta acudir a cuatro y en la planificación real a tres, existe una diferencia de una unidad siempre. El porcentaje medio de utilización de recursos por parte de la optimización es del 86,1 %, mientras que para la planificación real es del 71,8 %.

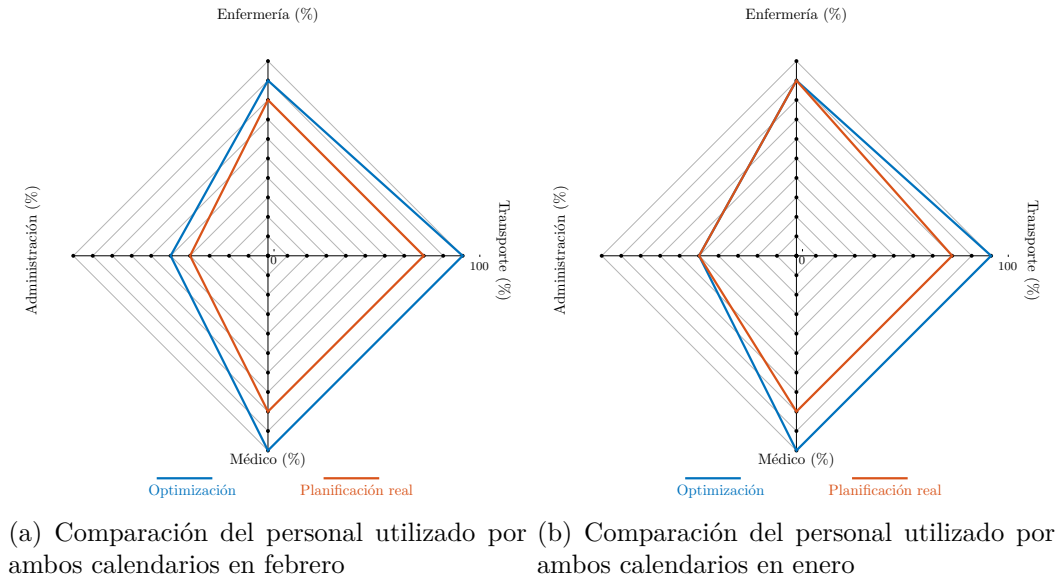


Figura 5.7: Comparación de los recursos utilizados, en tanto por ciento, entre el calendario realizado por la herramienta y el real, para cada tipo de recurso.

5.2.4. Análisis de distancia recorrida

La distancia, a pesar de no ser un objetivo a optimizar, tiene gran importancia, ya que el coste varía en función de ella. La región de Murcia se encuentra dividida en 4 zonas o módulos geográficos, clasificados como A, B, C y D. Este criterio no se basa siempre en la distancia al Centro de Hemodonación, sino en la pertenencia a un área metropolitana concreta. No obstante se puede establecer un radio aproximado de acción por zona¹. Este se puede apreciar en la tabla 5.1.

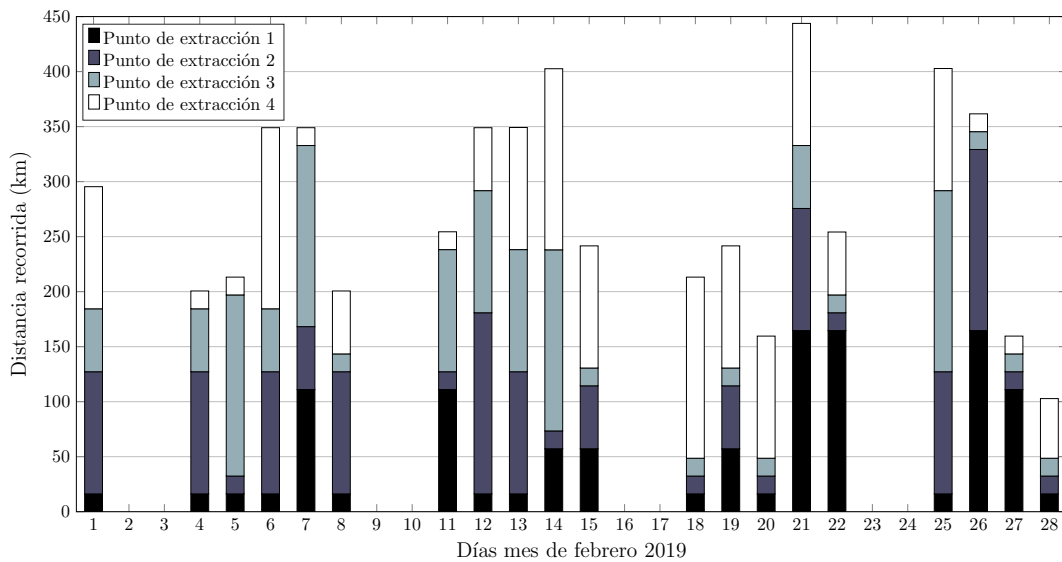
Módulo	Distancia promedio (km)
A	8,1
B	28,6
C	55,5
D	82,3

Cuadro 5.1: Radio de acción para de los módulos

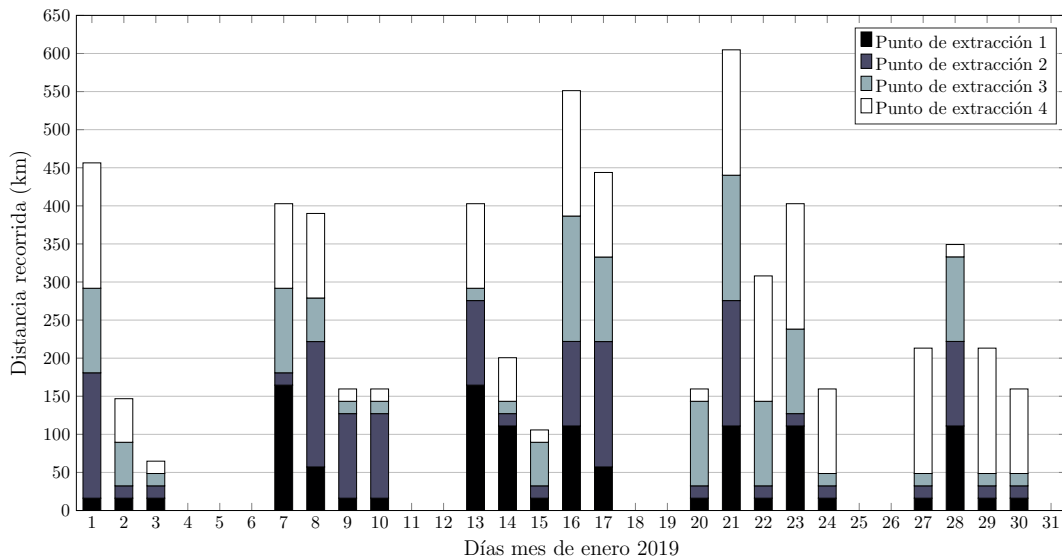
Se puede ver una representación de los módulos en función de la distancia al Centro Regional de Hemodonación en la figura 1.3, del capítulo 1. En ella se aprecia como se divide la comunidad autónoma en función de estos módulos que acabamos de comentar y cómo los distintos puntos de extracción y hospitales interactúan con el CRH. Hay que tener en cuenta que la distancia de estos módulos es en línea recta y no la del trayecto del CRH al punto de extracción.

¹Los radios se han calculado como el promedio de la distancia del CRH a los puntos de extracción extracción pertenecientes a cada módulo

En figura 5.8 se muestra la distribución de las distancias y zonas para cada uno de los días de los meses de enero y febrero. Como se puede comprobar en la figura 5.8 la distribución de zonas es mayor en la planificación de la herramienta que en la realizada por el centro, garantizando así también la posibilidad de donar sangre en todo el territorio. Cada color representa cada uno de los cuatro módulos.



(a) Desglose de la distancia recorrida por las unidades móviles para el mes de febrero

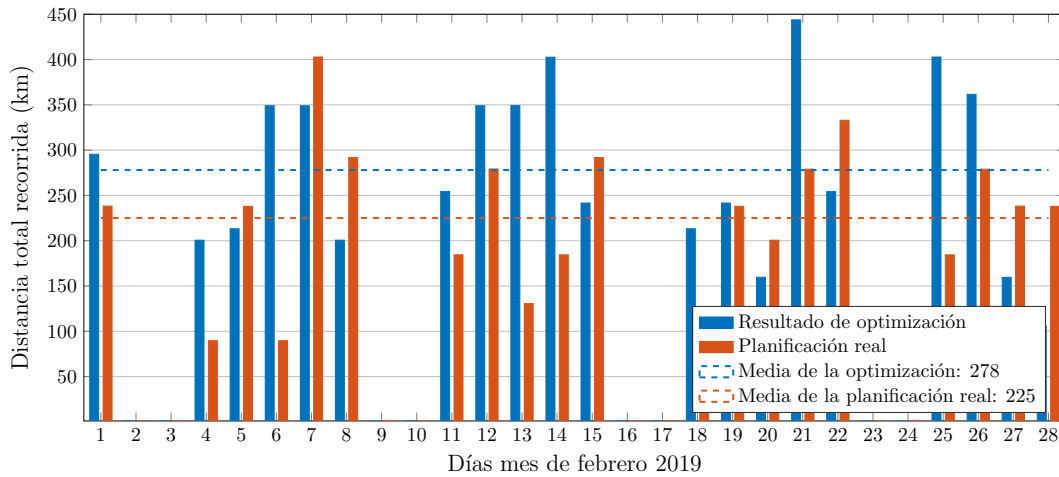


(b) Desglose de la distancia recorrida (ida y vuelta) por las unidades móviles para el mes de enero

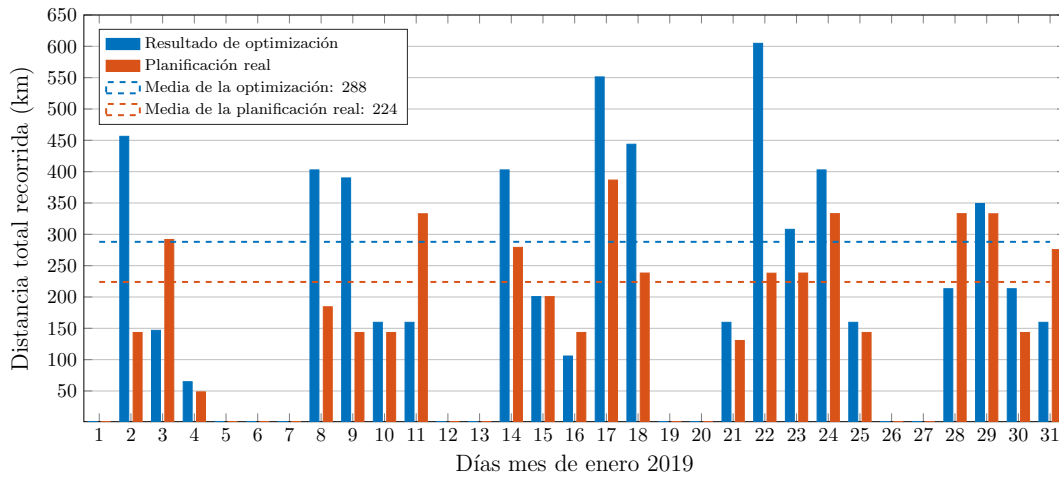
Figura 5.8: Comparativa entre la distancia recorrida por todas las unidades móviles para cada uno de los días de ambos meses

Comparando en la figura 5.9 el mes de febrero con la planificación real, se puede apreciar como, salvo para la segunda semana, las distancias recorridas son

similares. Para el calendario propuesto por la herramienta la distancia recorrida total es de 5.546,6 km, mientras que para el real son 4.500,2 km. Este es un hecho relevante ya que, como se mencionó anteriormente: la optimización selecciona cuatro puntos de extracción mientras que la planificación real solo a tres. Por lo tanto, a pesar de que no fuera un objetivo y, teniendo en cuenta los resultados obtenidos para el número de bolsas de sangre, la distancia recorrida por la planificación de la herramienta es un 23 % superior.



(a) Comparativa de la distancia recorrida en cada uno de los dos calendarios en febrero



(b) Comparativa de la distancia recorrida en cada uno de los dos calendarios en enero

Figura 5.9: Comparativa de la distancia recorrida por día en cada uno de los dos calendarios de ambos meses

Si para el mes de enero se comparan ambos calendarios, existe una diferencia de kilómetros ligeramente superior a la de la solución anterior. En este caso, la herramienta determina una distancia de 6.054,2 km frente a 4.703,8 km para la planificación del CRH. Como se puede ver en la figura 5.9, hay días en los que los kilómetros recorridos son mayores para la planificación real, sin embargo en el resto existe una diferencia significativa, de ahí la mayor diferencia.

La figura 5.9 muestra la comparación diaria del número de kilómetros recorridos por ambos calendarios. La línea azul representa la distancia recorrida por las unidades móviles en el calendario desarrollado por la herramienta, mientras que la naranja es la distancia real que recorrieron el pasado mes de febrero.

5.2.5. Análisis de costes

Para calcular el coste de la campaña hay que tener en cuenta varios factores relacionados entre sí:

- Personal. Cantidad de personas que tengan que acudir al punto de extracción, en función de los criterios mencionados en el capítulo 3 de esta sección: personal médico y administrativo. Recordar que este personal puede ser fijo de plantilla o subcontratado externo. En este apartado se tiene en cuenta el coste del personal externo, ya que su salario, a diferencia del personal interno, es variable en función de la distancia recorrida.
- Distancia a recorrer. En función de la distancia del Centro de Hemodonación al destino, el coste de enviar personal varía, habiendo para cada módulo y tipo de personal un coste fijo asignado. En la tabla 5.2 se pueden ver los distintos precios establecidos según el Boletín Oficial de la Región de Murcia [25].

Módulo	Médico	Enfermero	Administrativo	Conductor
A	120,77	89,24	63,83	75,60
B	135,45	100,07	71,58	84,79
C	146,43	108,22	77,41	91,68
D	167,53	123,82	88,54	104,91

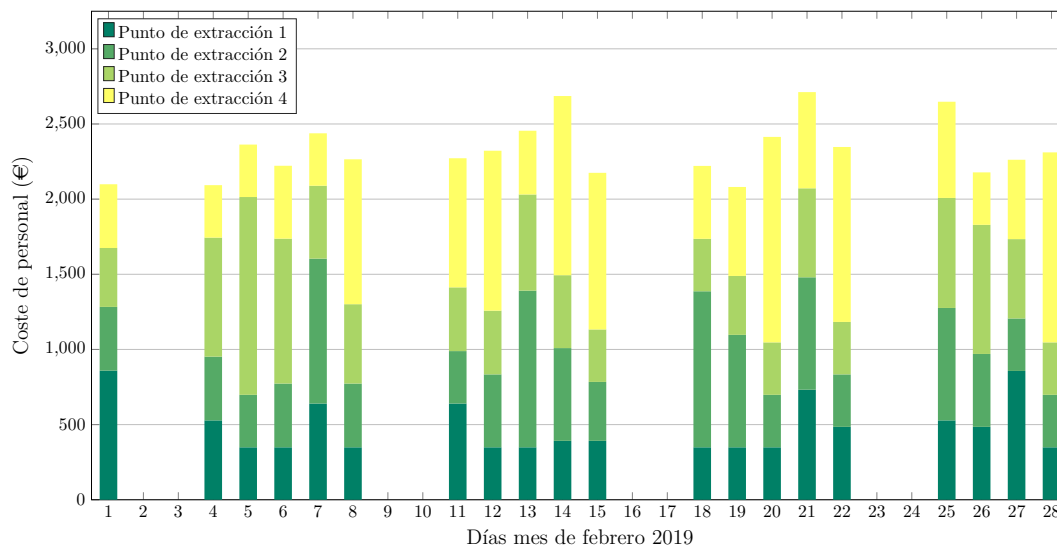
Cuadro 5.2: Precio del personal para cada módulos

En la figura 5.10 se desglosa el gasto del calendario propuesto por la herramienta. Cada columna está formada por cuatro colores que se corresponden con el gasto relativo a cada punto de extracción visitado.

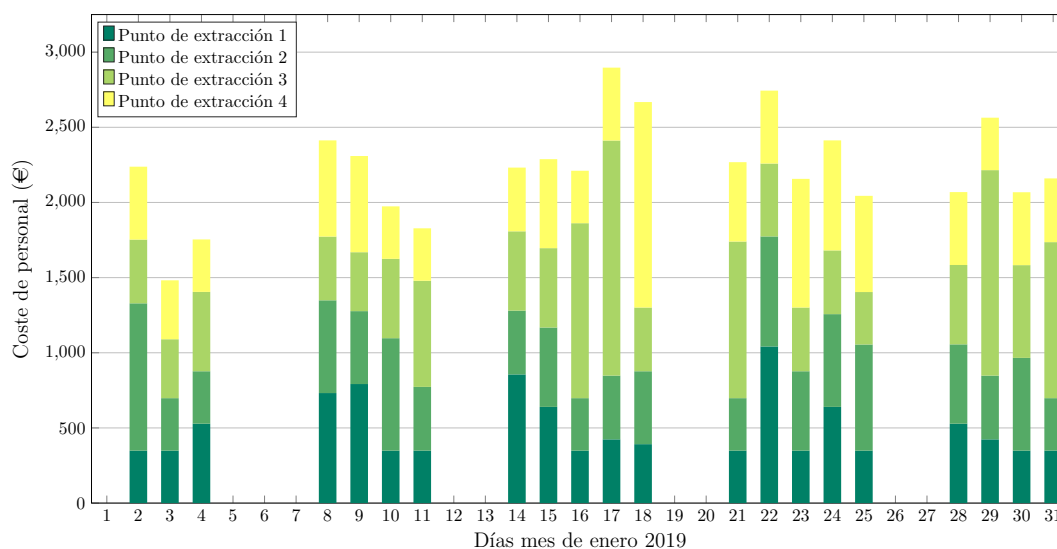
El coste total de personal para el calendario propuesto por la herramienta para el mes de febrero es de 46.574,7 €, siendo el promedio diario de gasto de 2.328,0 € por día. Por otro lado, para el mes enero ha sido de 46.788,9 €, muy similar al anterior. El coste del calendario real es de 38.010,1 € para el mes de febrero y 41.268,1 € para el mes de enero. Esto supone que, para el mes de febrero el gasto se ha incrementado un 22.5 % y para enero un 13.4 %.

La razón por la que el calendario real tiene un precio inferior al propuesto por el calendario, al igual que en la distancia recorrida y el número de ciudades visitadas, radica en la cantidad de bolsas de sangre extraídas. En la propuesta del centro, al haber recogido una menor cantidad de bolsas de sangre, necesita menor cantidad de personal y visitar menos ciudades (menor distancia a recorrer). Por lo

tanto, aunque pueda parecer que la planificación real tiene mejores resultados, hay que tener en cuenta que no cumple el objetivo de bolsas de sangre recogidas.



(a) Desglose del precio diario de realizar cada extracción para el mes de febrero, donde cada punto de extracción viene representado por un color en cada día



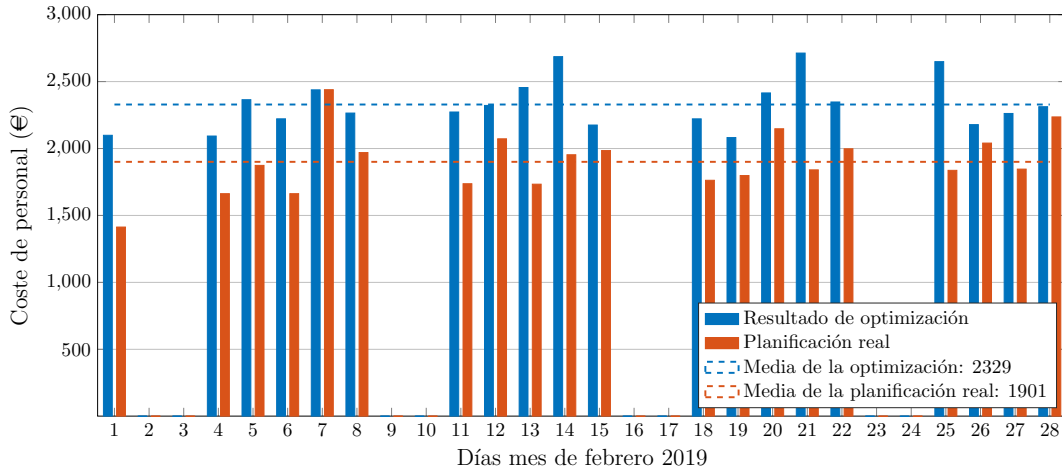
(b) Desglose del precio diario de realizar cada extracción para el mes de enero, donde cada punto de extracción viene representado por un color en cada día

Figura 5.10: Comparativa del coste por día en cada uno de los dos calendarios de ambos meses

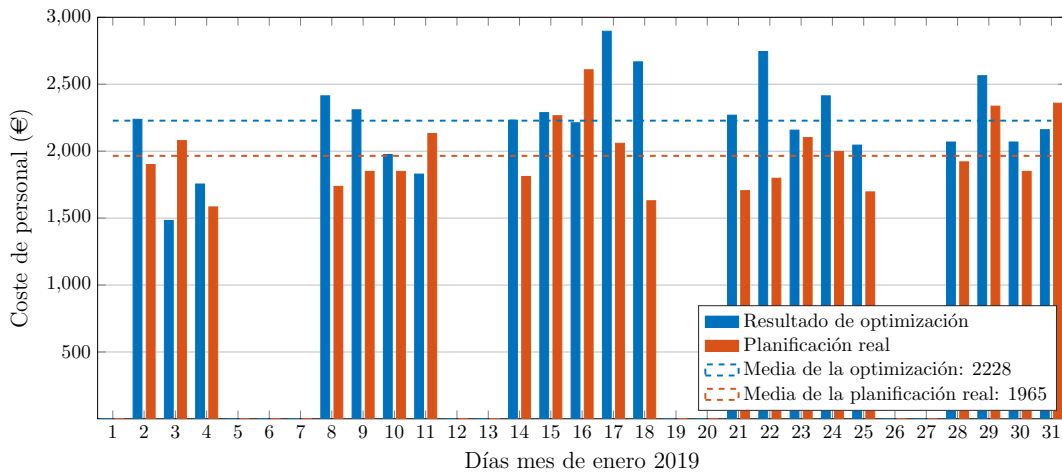
En la figura 5.11 se puede ver una comparativa entre el gasto del calendario del centro y el calendario de la herramienta. La línea azul representa este último, mientras que la naranja al primero.

Las métricas que se han comentado en este capítulo, a excepción del número de bolsas de sangre a extraer, no eran objeto de optimización. Se ha realizado la

comparación para ver la similitud con el modelo empleado por el centro. Por lo tanto, el lector no debe caer en la confusión de pensar que la nueva planificación ha empeorado los resultados, sino todo lo contrario, ya que ha mejorado el objetivo sustancialmente.



(a) Comparativa de coste entre el modelo real y la optimización para el mes de febrero



(b) Comparativa de coste entre el modelo real y la optimización para el mes de enero

Figura 5.11: Comparativa del coste incurrido por día en cada uno de los dos calendarios de ambos meses

5.3. Calendario optimizado

Para finalizar este capítulo de resultados, se muestra el aspecto del calendario que la herramienta exporta como solución de la planificación. Se puede observar para la figura 5.12 la visión general del mes de febrero, con todos los eventos que lo conforma. En la figura 5.13, se representa la vista concreta de un evento determinado, con todos los parámetros que se incluyen.

lunes		martes		miércoles		jueves		viernes		sábado		domingo	
28/01		29		30		31		01/02		02		03	
10 13701: LES SAMANIEGO		10 04704: LES JUAN CARLOS I - MAÑANA		10 0806: COMANDANCIA DE LA GUARDIA CIVIL		10 20200: ACQUATELAMIENTO GENERAL LOPEZ PINTO		10 13035: LES SANJE		10 14800: CIUDAD SANTARIA VIRGEN DE LA ARBOCACA		10 13026: HERNAME	
10 21608: REINERIA ESCOMBERRAS		16 04078: LES JUAN CARLOS I - TARDE		10 28070: CENTRO INTEGRADO DE FORMACION PROFESI		10 20600: ARSENAL MILITAR		10 28070: CLEP HESPERIDES		16 17700: RIBERA DE MOLINA		16 20334: SAN ANTON - CARTAGENA	
16 12500: LORQUI		16 12200: JUMILLA		16 0800: ALHAMA DE MURCIA		16 09900: LA ENCANACION		16 12700: MOLINA DE SEGURA		16 13008: SAN JOSE DE LA VEGA			
16 0600: BARRIO INFANTE JUAN MANUEL		16 13043: SAIGONERA LA SECA		16 44300: YECIA		16 13003: ALGEZARES							
04		05		06		07		08		09		10	
10 13701: LES SAMANIEGO		10 04704: LES JUAN CARLOS I - MAÑANA		10 0806: COMANDANCIA DE LA GUARDIA CIVIL		10 20200: ACQUATELAMIENTO GENERAL LOPEZ PINTO		10 13035: LES SANJE		10 14800: CIUDAD SANTARIA VIRGEN DE LA ARBOCACA			
10 21608: REINERIA ESCOMBERRAS		16 04078: LES JUAN CARLOS I - TARDE		10 28070: CENTRO INTEGRADO DE FORMACION PROFESI		10 20600: ARSENAL MILITAR		10 28070: CLEP HESPERIDES		16 17700: RIBERA DE MOLINA			
16 12500: LORQUI		16 12200: JUMILLA		16 0800: ALHAMA DE MURCIA		16 09900: LA ENCANACION		16 12700: MOLINA DE SEGURA		16 13008: SAN JOSE DE LA VEGA			
16 0600: BARRIO INFANTE JUAN MANUEL		16 13043: SAIGONERA LA SECA		16 44300: YECIA		16 13003: ALGEZARES							
11		12		13		14		15		16		17	
10 0900: IBERVUTUAMUR		10 09150: TESORERIA GENERAL DE LA SEGURIDAD SOCIAL		10 00150: LES INGENIERO DE LA CIENYA		10 00651: GERENCIA DE URBANISMO		10 10003: FRIFOZO					
10 26031A: SAJIC - MAÑANA		10 30350: AVUNTAMIENTO DE PUERTO LUMBERERAS		16 05002: SAN JAVIER		10 19010: BASE AREA DE ALCANTARILLA		10 20600: BOTQUIN					
16 12300: LIBRILLA		16 00332: BALSAPUNTADA		16 21621: SANTA ANA		16 01500: CARAVACA DE LA CRUZ		16 01662: SANTA CRUZ					
16 26031B: SAJIC - TARDE		16 01800: CEITI		16 23904: CANTERAS		16 39067: LORCA		16 33900: TOTANA					
18		19		20		21		22		23		24	
10 0000: ESTADIO NUEVA CONDOMINA		10 20200: ACQUATELAMIENTO TENEGORRA		10 00445: AVUNTAMIENTO DE MURCIA		10 33900: CABILDO SUPERIOR DE PROCESSIONES DE TOJA		10 19004: HERO - MAÑANA					
10 04800: HOSPITAL UNIVERSITARIO VIRGEN DE LA ARBO		10 3000: CENTRO REGIONAL DE HEMODONACION		10 05004: LES MIGUEL DE CERVANTES - MAÑANA		10 39067: LORCA SANTA ROSA DE LIMA		10 30800: LA ESCUCHA - LORCA					
16 0030: BARRIO DEL PROGRESO		16 12703: ROTARY CLUB MOLINA DE SEGURA		16 01700: CEHEGN		10 39067: LORCA SANTA ROSA DE LIMA		16 00900: ARCHEVA					
16 32402: ALMENDRICOS		16 13850: EL FENAZAR		16 05000: LES MIGUEL DE CERVANTES - TARDE		16 04000: ULEA		16 01700B: HERO - TARDE					
						16 21599: BARRIO PERAL							
25		26		27		28		01/03		02		03	
10 0050: ACADENIA GENERAL DEL AIRE		10 01507: LES GINES PEREZ CARRINOS		10 03004: AMINSA - MAÑANA		10 00850: SERVICIO MURCIANO DE SALUD							
10 03999: CONSUMIA SOCIEDAD COOPERATIVA VALENCIA		10 02704: LES CAÑADA DE LAS HERBAS		10 02700: ENIGAF TERCIO DE LEVANTE		10 09525: GRUPO M. TORRES (AERONAUTICA)							
16 30200: LES SAN JUAN BOSCO - LORCA		16 13033: EL PALMAR		16 03000B: AMINSA - TARDE		16 02900: MULA							
16 39101: EL PARETON		16 22223: SAN JOSE OBRERO		16 03015: CORVEBA		16 03510: SUCINA							

Figura 5.12: Visión general del mes de febrero del calendario que exporta la herramienta

Detalles

● ▾ 33900: TOTANA			
TOTANA			
Inicio: 15 de febrero de 2019		16:00 ▾	<input type="checkbox"/> Todo el día
Fin: 15 de febrero de 2019		19:00 ▾	
Vehículo: FXT - Estimación de unidades de ST: 102 - Previsión de donantes: 130			

Figura 5.13: Visión de los detalles de un evento específico del calendario propuesto

CAPÍTULO 6

Conclusiones y líneas de futuro

6.1. Conclusiones

Como objetivos fundamentales de este proyecto se plantean (i) elaborar una planificación mensual de las campañas de donación de sangre para el Centro Regional de Hemodonación de Murcia, teniendo en cuenta las necesidades del mismo y el historial de extracciones realizadas a lo largo de la geografía de la región; y (ii) que la herramienta sea capaz de exportar un calendario con dicha planificación, en un archivo con formato *.ics*, donde se especifique de manera visual la planificación anteriormente mencionada. Esta herramienta servirá como guía al personal del centro encargado de elaborar la planificación de las campañas, añadiendo o quitando restricciones en función de las necesidades puntuales que tengan.

Se ha demostrado que es posible optimizar el servicio de planificación de extracciones, alcanzando un número diario de bolsas de sangre con una precisión del 95,61 %. Los resultados obtenidos se pueden clasificar en dos tipos: solución óptima que cumple la cantidad objetivo y solución óptima que no lo cumple. Para el primero de los supuestos (que supone la mitad de los meses del año) se tiene una precisión del 100 %, mientras que para el segundo es de 89,91 %. cabe destacar que la planificación llevada a cabo por el Centro Regional de Hemodonación, apenas alcanza una precisión del 80 %.

Las restricciones planteadas por el centro para asemejar la optimización a la planificación real llevada a cabo han sido cumplidas satisfactoriamente. Algunas de ellas son especialmente relevantes:

- Se ha incluido una tasa interanual de crecimiento, lo que implica que el centro, cada año, aumentará las extracciones diarias, asegurando un correcto abastecimiento a los hospitales. Cabe mencionar que esta tasa ya se intentó añadir por parte del centro, con resultado negativo.
- Optimizar las extracciones en vísperas de fines de semana y días festivos. De esta manera el centro se asegura tener suministro suficiente con independencia de periodos vacacionales o festivos.

- Inclusión de porcentaje de donantes jóvenes. La planificación prioriza acudir a centros educativos. De esta forma, la gente joven comenzará a ocupar un lugar importante en el registro de donantes, garantizando y fidelizando una renovación del mismo.

Se ha realizado un análisis de la implicación de los resultados de optimización en lo que refiere a métricas indirectas (que no eran objetivo de la optimización). La media de utilización de recursos humanos disponibles ha sido del 86,2 %. Se ha producido un incremento del 13 % del coste (5.306,6 €), y del 25 % para la distancia recorrida por las unidades (523,2 km). A pesar de que puedan parecer resultados adversos, cabe mencionar que estas métricas dependen del objetivo principal de bolsas de sangre, que ha aumentado en más de 40 unidades diarias con respecto a la planificación que se está haciendo actualmente en el Centro Regional de Hemodonación de Murcia. Si comparamos el coste del centro con el de la planificación de la herramienta, se trata de un coste proporcional a la cantidad extra de bolsas de sangre recogidas (igual sucede con los km), de modo que, a pesar de ser más caro en total, cogemos tantas bolsas más que el coste extra por cada una de ellas es mínimo.

El resultado de optimización da lugar a un calendario, en el se ha conseguido desarrollar una plantilla en la que se incluyen todos los resultados de la herramienta de optimización, así como los días festivos de manera automática y transparente para los operarios del centro. Este archivo —válido para cualquier aplicación de intérpretes de calendario— cuenta con todos los detalles relevantes a la optimización.

A nivel técnico se ha conseguido crear una herramienta que servirá a futuras investigaciones en el campo de la optimización de recursos, y será útil para la industria de gestión de centros de extracción y bancos de sangre. El modelado y tratamiento de datos ha sido diseñado de forma que sea válido para cualquier base de datos en formato CSV que se introduzca. El calendario desarrollado se adapta también a cualquier resultado de la herramienta, no siendo necesario modificar ningún parámetro.

Por lo tanto se puede asegurar que los dos objetivos principales de la herramienta se han cumplido.

6.2. Líneas de futuro

A continuación se plantean líneas de mejora para el futuro desarrollo de la aplicación. Como se comentó al comienzo del documento, no existe ni literatura ni desarrollos prácticos relacionados con la planificación de las campañas de extracción de sangre, tratándose de un proyecto pionero. La inclusión de mejoras en el desarrollo actual mejoraría la funcionalidad de ésta e incrementaría su valor. Se propone:

1. Actualización periódica de la base de datos. La optimización realizada por la herramienta es determinista, es decir, para un mes concreto siempre exporta la misma solución. Desde el Centro de Hemodonación se ha facilitado el conjunto de las donaciones entre los años 2007 y 2017. Sería muy útil que, a medida que

van transcurriendo los meses y se van realizando más campañas de extracción, esta base de datos se fuese actualizando periódicamente. De esta forma, cada mes de un determinado año será diferente al mismo mes del año siguiente. Si esta acción no se realiza la herramienta perderá gran parte de su utilidad porque todos los meses determinados de cada año serían iguales.

2. Modelo de datos continuado. En el presente trabajo se toma cada uno de los meses como paquetes indivisibles. Se propone ver el año como un modelo continuado y no fragmentado. De esta forma, emplazar a los donantes de un punto de extracción a otra fecha, de manera paulatina, es posible. Del modo actual, los cambios bruscos de fecha en un punto de extracción no es posible.
3. Inclusión de un simulador de mejora de eficiencia de centro de hemodonación, que refleje en qué medida cambian los distintos parámetros si modificamos las constantes, como introducir una unidad móvil nuevo o quitar un punto de extracción. Añadiendo el simulador se podrá detectar qué parámetros son más relevantes y afectan a la eficiencia, mejorando así el funcionamiento general del centro.
4. Inclusión de más objetivos. En este trabajo el objetivo único ha sido la optimización de las bolsas de sangre extraídas. No obstante, como ya se ha visto en el capítulo de resultados, existen otras muchas métricas relevantes, como personal utilizado, coste o distancia. Incluir estas métricas como objetivos, con mayor o menor importancia en función de las necesidades del centro, daría una optimización global mayor que la actual.
5. Incorporación de una interfaz. La herramienta, como ya se ha visto, ha sido dividida en diferentes fases que realizan diferentes funciones. Sería muy útil la inclusión de todos estos módulos en una única interfaz que los aúne, de modo que se facilite su uso al personal clínico y de administración del centro no experto. Dicha interfaz debe incluir, además, una serie de campos para completar por el personal (objetivo de bolsas, restricciones, *etc.*), por si pudieran surgir particularidades concretas poder tenerlas controladas.

Bibliografía

- [1] Marieangela C. Wilson Allison Blair Timothy J. Satchwell Marjolein Meinders Nicola Cogan Sabine Kupzig Ryo Kurita Yukio Nakamura Ashley M. Toye David J. Anstee Jan Frayne Kongtana Trakarnsanga, Rebecca E. Griffiths. An immortalized adult human erythroid line facilitates sustainable and scalable generation of functional red cells. Nature Communications volume 8, 2017.
- [2] Juan José Salazar González Diego Díaz Rodríguez. Optimización de la producción de plaquetas en el instituto canario de hemodonación y homoterapia. Universidad de La Laguna, Facultad de Ciencias, 2018.
- [3] Giuliana Carello Ettore Lanzarone Zeynep Ocak Baş, Seda and Semih Yalçındağ. Management of blood donation system: Literature review and research perspectives. Springer Proceedings in Mathematics Statistics (Proceedings of HCSE 2015), 2016.
- [4] Kurt M. Bretthauer and Murray J. Côté. A model for planning resource requirements in health care organizations. Decision Sciences 29, 1998.
- [5] Tugba Cayirli and Emre Veral. Outpatient scheduling in health care: A review of literature. Production and Operations Management, 2003.
- [6] Rachel R. Chen and Lawrence W. Robinson. Sequencing and scheduling appointments with potential call-in patients. Production and Operations Management, 2014.
- [7] Seda Baş Güre, Giuliana Carello, Ettore Lanzarone, and Semih Yalçındağ. Unaddressed problems and research perspectives in scheduling blood collection from donors. Production Planning & Control, 29(1):84–90, 2018.
- [8] JM De la Cruz, A Herrán-González, JL Risco-Martín, and B Andrés-Toro. Hybrid heuristic and mathematical programming in oil pipelines networks: Use of immigrants. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 6(1):9–19, 2005.
- [9] Pourmahmood N. Aghababa M.P. Aghdam K.M. Mirzae I. Design of water distribution networks using accelerated momentum particle swarm optimisation technique. Journal of Experimental Theoretical Artificial Intelligence, 2014.
- [10] Simpson A.R. Murphy L.J. Pipe network optimization using genetic algorithms. Department of Management Science and Engineering. Stanford University., 1992.

- [11] Y Bandyopadhyay M Kumar D. N., Rao M. R. Optimal design of water distribution systems using linear programming gradient (lpg) method. Indian Water Work Association, 1998.
- [12] Bolivar Y. E. Un modelo de rendimientos de algoritmos evolutivos aplicados a la selección de la solución deseada. Universidad de Granada, 2009.
- [13] A. Villagra G. Pereira, D. Pandolfi. Diseño y optimización de redes de distribución de agua utilizando algoritmos genéticos. Universidad Nacional de la Patagonia Austral Unidad - Académica Caleta Olivia, 2016.
- [14] Michelle Cheong Murphy Choy. A flexible mixed integer programming framework for nurse scheduling. Singapore Management University, School of Information System, 2012.
- [15] T. Gocken A. Baykasoglu. Multi-objective aggregate production planning with fuzzy parameters. Advances in Engineering Software, 2010.
- [16] K. Womer H. Li. Scheduling projects with multi-skilled personnel by a hybrid milp/cp benders decomposition algorithm. J. Sched., 2009.
- [17] L. Silbermayr D. Tavaghoof-Gigloo, S. Minner. Mixed integer linear programming formulation for flexibility instruments in capacity planning problems. Surv. Oper. Res. Manag. Sci., 2016.
- [18] R. Pellerin C. Sitompul E.-H. Aghezzaf H. Allaoui, P. Castagliola. An integrated hierarchical production and maintenance-planning model. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2011.
- [19] A. Mohafid N.M. Najid, M. Alaoui-Selsouli. An integrated production and maintenance planning model with time windows and shortage cost. International Journal of Production Research, 2011.
- [20] Philippe Duquenne Ahmed Karam, El-Awady Attia. A MILP model for an integrated project scheduling and multi-skilled workforce allocation with flexible working hours. IFAC Volume 50, 2017.
- [21] Centro Regional de Hemodonación. Estudio de modelos de predicción de hemoglobina en donantes. CRH, 2014.
- [22] Bruce L. Golden Michael C. Fu Jennifer D. Michael, John E. Brennan. A simulation study of donor scheduling systems for the american red cross. Elsevier, 1991.
- [23] Vincent Augusto Olivier Garraud Edgar Alfonso Lizarazo, Xiaolan Xie. Modelling and simulation of blood collection systems: improvement of human resources allocation for better cost-effectiveness and reduction of candidate donor abandonment. Vox Sanguinis, Wiley, 2013.
- [24] Harold K. Rappoport John E. Brennan, Bruce L. Golden. Go with the flow: Improving red cross bloodmobiles using simulation analysis. Informis, 1992.

- [25] Servicio Murciano de Salud. Consejería de Salud. Resolución del director gerente del servicio murciano de salud sobre retribuciones del personal estatutario del servicio murciano de salud para el año 2018. BORM (Boletín Oficial de la Región de Murcia), 2018.
- [26] IBM. IBM ILOG OPL Language User's Manual. Business Machines Corporation, 2009.
- [27] ILOG. IBM CPLEX 11.0 User's Manual. ILOG Inc., 2007.
- [28] Pablo Romano. Instructivo de CPLEX. Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, 2012.

Parte I

Anexos

Restricciones

Se presentan a continuación las restricciones correspondientes a la primera y segunda iteración. Igual que para la tercera, ambas se encuentran definidas en función de las siglas de las variables (tabla 3.2) y de las constantes (tabla 3.1).

Primera iteración

- Restricción 1. Las unidades móviles u no pueden transportar una cantidad de bolsas de sangre mayor que la que les permite su capacidad.

$$\begin{aligned} UM[d, u, p] &\leq C[u] \\ \forall d \in D \\ \forall u \in U \\ \forall p \in PE \end{aligned} \tag{1}$$

- Restricción 2. Las unidades móviles u no pueden recoger más bolsas de sangre de las que se han recogido en años anteriores. Es decir, la cantidad de bolsas de sangre que transporte debe ser menor o igual que las que aparecen en la base de datos.

$$\begin{aligned} UM[d, u, p] &\leq DP[u, m] \\ \forall d \in D \\ \forall u \in U \\ \forall p \in PE \end{aligned} \tag{2}$$

- Restricción 3. Para aquellos puntos de extracción p donde el historial de donaciones marque que, para el mes en el que se realice la planificación, no hubo ninguna extracción en los años anteriores, se fuerza a la variable α a valer 0, de modo que los vehículos no puedan acudir.

$$\begin{aligned} \sum_d \sum_u \alpha[d, u, p] &= 0 \\ \forall p \in PE : DP[p, m] &= 0 \end{aligned} \tag{3}$$

- Restricción 4. Las unidades móviles u solo pueden estar en un punto de extracción p a la vez.

$$\sum_p \alpha[d, u, p] \leq 1 \quad (4)$$

$$\forall d \in D$$

$$\forall u \in U$$

- Restricción 5. Las unidades móviles u solo pueden ir a un punto de extracción p por día.

$$\sum_d \alpha[d, u, p] \leq 1 \quad (5)$$

$$\forall u \in U$$

$$\forall p \in PE$$

- Restricción 6. La cantidad de bolsas de sangre que se puede obtener en cada punto de extracción p en todo el mes, para todas las unidades móviles, será como mucho la cantidad que marque el historial, en ningún caso superior.

$$\sum_d \sum_u UM[d, u, p] \leq DP[p, m] \quad (6)$$

$$\forall p \in PE : DP[p, m] \neq 0$$

- Restricción 7. Cuando una unidad móvil u vaya a un punto de extracción p , el valor de la variable α valdrá 1, estando el valor de la variable UM entre 1 y el historial de donaciones.

$$\alpha[d, u, p] \cdot DP[p, m] \leq UM[d, u, p] \quad (7)$$

$$\forall d \in D$$

$$\forall u \in U$$

$$\forall p \in PE$$

- Restricción 8. Cuando una unidad móvil u vaya a un punto de extracción p , el valor de la variable α valdrá 1, estando el valor de la variable UM entre 1 y la capacidad de la unidad móvil. A priori puede parecer que las restricciones 7 y 8 son idénticas. La diferencia radica en que una pone de límite el número de bolsas de sangre en el historial y otra la capacidad de la unidad móvil. Se colocan dos restricciones diferentes para que no sobrepase, en ningún caso, ninguno de los dos límites.

$$\begin{aligned}
UM[d, u, p] &\leq \alpha[d, u, p] \cdot C[u] \\
&\forall d \in D \\
&\forall u \in U \\
&\forall p \in PE
\end{aligned} \tag{8}$$

- Restricción 9. La variable β valdrá 1 si cualquiera de las unidades móviles u ha acudido al punto de extracción p .

$$\begin{aligned}
\beta[d, p] &= \sum_u \alpha[d, u, p] \\
&\forall d \in D \\
&\forall p \in PE
\end{aligned} \tag{9}$$

- Restricción 10. Cada día hay que visitar, como mínimo, dos puntos de extracción p .

$$\begin{aligned}
\sum_p \beta[d, p] &\geq 2 \\
&\forall d \in D
\end{aligned} \tag{10}$$

- Restricción 11. La variable γ tomará el valor 1 si el punto de extracción p ha sido visitado a lo largo del mes.

$$\begin{aligned}
\sum_d \sum_u \alpha[d, u, p] &= \gamma[p] \\
&\forall p \in PE
\end{aligned} \tag{11}$$

Segunda iteración

Para la segunda iteración se ha reutilizado las ecuaciones (1), (3), (4) y (5) de la primera iteración. Las restantes han sufrido ligeras modificaciones para adaptarlas a nuevas restricciones. Además se han añadido otras nuevas que antes no figuraban.

- Restricción 1. Se ha modificado la cantidad máxima que pueden transportar las unidades móviles u a la cantidad que refleje la base de datos para cada punto de extracción p , sumado a la desviación típica de este (σ_{dp}).

$$\begin{aligned}
UM[d, u, p] &\leq (DP[p, m] + \sigma_{dp}[p, m]) \\
&\forall d \in D \\
&\forall u \in U \\
&\forall p \in PE
\end{aligned} \tag{12}$$

- Restricción 2. La cantidad de bolsas de sangre que se puede obtener para cada punto de extracción p por mes no superará la cantidad reflejada en la base de datos más la desviación típica añadida (σ_{dp}).

$$\sum_d \sum_u UM[d, u, p] \leq (DP[p, m] + \sigma_{dp}[p, m]) \quad (13)$$

$$\forall p \in PE : DP[p, m] \neq 0$$

- Restricción 3. Cuando una unidad móvil vaya a un punto de extracción, el valor de la variable α valdrá 1. El valor que tome la variable UM tomará como limite superior la variación máxima que ofrece su desviación típica más el valor del registro histórico. Además, se añade el factor de días laborables y no laborables para que, en caso de ser festivo, no se realicen extracciones.

$$UM[d, u, p] \geq (DP[p, m] + \sigma_{dp}[p, m]) \cdot \alpha[d, u, p] \cdot DL[m, d] \quad (14)$$

$$\forall d \in D$$

$$\forall u \in U$$

$$\forall p \in PE$$

- Restricción 4. Cuando una unidad móvil u vaya a un punto de extracción p , el valor de la variable α valdrá 1. El valor que tome la variable UM tomará como limite inferior la variación máxima que ofrece su desviación típica menos el valor del registro histórico. Además, se añade el factor de días laborables y no laborables para que, en caso de ser festivo, no se realicen extracciones.

$$UM[d, u, p] \leq (DP[p, m] + DDP[p, m]) \cdot \alpha[d, u, p] \cdot DL[m, d] \quad (15)$$

$$\forall d \in D$$

$$\forall u \in U$$

$$\forall p \in PE$$

- Restricción 5. Esta restricción funciona en paralelo con la anterior. Cuando una unidad móvil u acude a un punto de extracción p , pone el valor de la variable α a 1, limitando también la cantidad máxima de bolsas de sangre a recoger a la capacidad máxima de la unidad móvil. La idea es que si la cantidad de bolsas de sangre que aparece en el historial es menor que la capacidad de la unidad móvil, sea esta primera quién limite la cantidad de bolsas recogidas y, en el caso de que la capacidad sea menor, sea esta última la que limite.

$$\begin{aligned}
UM[d, u, p] &\leq DL[m, d] \cdot \alpha[d, u, p] \cdot C[u] \\
&\forall d \in D \\
&\forall u \in U \\
&\forall p \in PE
\end{aligned} \tag{16}$$

- Restricción 6. La variable β funcionará de la misma manera que en la iteración anterior. Tomará en valor 1 en caso de que cualquiera de las cuatro unidades móviles u visite un punto de extracción p , solo que en esta iteración se limita a los días laborables.

$$\begin{aligned}
\beta[d, p] &= \sum_a DL[m, d] \cdot \alpha[d, u, p] \\
&\forall d \in D \\
&\forall p \in PE
\end{aligned} \tag{17}$$

- Restricción 7. Cada día laborable se deben visitar, al menos, dos puntos de extracción p diferentes.

$$\begin{aligned}
\sum_p \beta[d, p] &\geq 2 \\
&\forall d \in D : DL[m, d] \neq 0
\end{aligned} \tag{18}$$

- Restricción 8. La variable γ tomará el valor 1 si el punto de extracción p ha sido visitado a lo largo del mes en los días laborables.

$$\begin{aligned}
\sum_d \sum_u DL[m, d] \cdot \alpha[d, u, p] &= \gamma[l] \\
&\forall p \in PE
\end{aligned} \tag{19}$$

Parte II

Anexos

Aspectos éticos, económicos, sociales y medio ambientales

En este apartado se evalúan los aspectos éticos, económicos sociales y medio ambientales que provoca el desarrollo de este proyecto.

Introducción

El desarrollo de la herramienta lleva consigo una serie de implicaciones en distintos ámbitos. Tal y como se verá a continuación, no solo tiene impacto en el desarrollo de la actividad del centro sino que su repercusión va más allá, implicando a distintos sectores de la sociedad.

El constante proceso de globalización que vivimos ha provocado que cada vez sea más sencillo acceder a la información y a los recursos disponibles. Este avance ha provocado que las fronteras entre los distintos sectores sean cada vez menores. En el caso de este trabajo, lo que puede parecer una simple herramienta ofimática para planificar campañas de donación de sangre, lleva tras de sí un gran impacto.

Descripción de impactos relevantes relacionados con el proyecto

El impacto de la herramienta se puede evaluar desde distintos puntos de vista.

Por un lado, el impacto social. La importancia que tiene la sangre en el sistema médico es muy elevada. Sin ella, muchos de los procesos que hoy en día se realizan con total normalidad pondrían en peligro muchas vidas humanas. Garantizar una estabilidad en el sistema de hemodonación se torna indispensable para garantizar el correcto funcionamiento del sistema.

Por otro lado, el impacto medio ambiental. Con la presente herramienta, a pesar de que no haya sido uno de los objetivos principales, se plantea como líneas futuras la inclusión de distintos objetivos, entre los que destacan la optimización de la distancia a recorrer. Con ello, se reducirá también el consumo de gasolina y, consecuentemente, las emisiones de gases nocivos.

Análisis detallado de alguno de los principales impactos

El principal impacto que tendrá el desarrollo de la herramienta será el impacto social. La sangre, como se ha comentado en el capítulo 1 de Introducción, tiene un papel fundamental para el correcto funcionamiento del cuerpo humano y, además es necesaria para garantizar también el tratamiento a los pacientes con enfermedades oncológicas o en grandes operaciones quirúrgicas. Por lo tanto, asegurar una correcta planificación de las campañas de donación se torna indispensable para asegurar un correcto funcionamiento del sistema de sanitario. La herramienta, consigue optimizar el número de bolsas de sangre recogidas cada día, asegurando así que las necesidades del Centro Regional de Hemodonación se cumplen, ayudando así a los pacientes que lo necesitan.

Por otro lado, donar sangre puede ser considerado como un derecho que debe ser accesible a todo el mundo —siempre y cuando cumpla unos requisitos mínimos, ya comentados en el capítulo 3 de metodología—. La herramienta, además de mejorar el objetivo de bolsas de sangre, garantiza que se acuda a la mayoría de municipios de la comunidad autónoma, garantizando así el derecho a donar sangre a todos los habitantes.

Conclusiones

El desarrollo de la herramienta no solo ha producido una mejora de las métricas del centro —sobre todo del objetivo principal de bolsas de sangre a extraer—, sino que ha mejorado otros parámetros sociales tan importantes como los estudiados en el caso. Con la planificación desarrollada por la herramienta se consigue un equilibrio tanto social como medioambiental, además de sanitario, aportando un pequeño grano de arena a la mejora del mundo en el que vivimos.

Presupuesto económico

El presupuesto consta de los siguientes conceptos:

- Presupuesto de ejecución material
- Gastos generales y beneficio industrial
- Honorarios por la redacción y dirección del proyecto
- Presupuesto total

El presupuesto de ejecución material junto a los gastos generales y el beneficio industrial constituyen lo que se denomina como presupuesto de ejecución por contrata. Este, junto con los honorarios por la redacción y dirección del proyecto, dan lugar al presupuesto total.

Todos los presupuestos se presentarán en Euros.

Presupuesto de ejecución material

El presupuesto de ejecución material recoge los costes de los recursos empleados (hardware, software y otros), así como la mano de obra.

Presupuesto de recursos materiales

A continuación, en la tabla 1, encontramos los recursos materiales utilizados a lo largo del proyecto.

Concepto	Coste	Amortización	Coste real
Teléfono móvil	120	21 %	25,20
Ordenador personal (software incluido)	850,00	16,66 %	141,61
Coste total:			166,81

Cuadro 1: Presupuesto de los recursos materiales

Concepto	Coste
Recursos materiales	166,81
Mano de obra	6.000,00
Total	6.166,81

Cuadro 3: Coste total de los recursos

Costes de mano de obra

Para la realización del proyecto es necesaria la intervención de un Data Analyst que se encargue del análisis de los datos y su tratamiento y una persona del Centro de Hemodonación supervisando el desarrollo. Este perfil se enmarca dentro del grupo de cotización 1 del Régimen General de Seguridad Social, con una jornada laboral de 8 horas al día y 21 días al mes. El desglose completo se puede consultar en el cuadro 2.

Puesto	Horas	Precio/Hora	Total
Data Analyst	250	20	5.000,00
Personal del CHR	50	20	1.000,00
Coste total:			6.000,00

Cuadro 2: Coste de mano de obra

Coste total de los recursos

El coste total de los recursos está formado por el coste de recursos materiales, costes de permisos y licencias y la mano de obra. Su desglose lo podemos ver en la tabla 3.

Gastos generales y beneficio industrial

Bajo el capítulo de gastos generales se incluyen todos aquellos gastos indirectos derivados de la utilización de instalaciones, amortizaciones, gastos fiscales, etc. Con esto, el presupuesto de ejecución por contrata queda como vemos en la tabla 4.

Concepto	Coste
Presupuesto de ejecución material	6.166,81
Gastos generales (16 % del P.E.M.)	986,68
Beneficio industrial (6 % del P.E.M.)	370,00
Total presupuesto de ejecución por contrata	7.523,49€

Cuadro 4: Gastos generales y beneficio industrial

Presupuesto total

Aplicando el 21 % de IVA, se obtiene el presupuesto total expuesto en el cuadro 5. El presupuesto total del proyecto asciende a ciento seis mil cuatrocientos treinta y ocho euros con ochenta y dos céntimos.

Concepto	Coste
Presupuesto Subtotal	7.523,49
I.V.A. (21 %)	1.579,93
Presupuesto total	9.103,42€

Cuadro 5: Honorarios y presupuesto total

Madrid, a 20 de junio de 2019

Fdo.: Eduardo Fernández García