

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN



TRABAJO FIN DE MÁSTER

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN
SIMULADOR DE HEMOVIGILANCIA PARA
OPTIMIZACIÓN Y ANÁLISIS DE UNA NUEVA
DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS DE LA
CADENA TRANSFUSIONAL

IÑAKI URANGA HERRANDORENA

JUNIO 2020

Trabajo Fin de Máster

Título: DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SIMULADOR
DE HEMOVIGILANCIA PARA OPTIMIZACIÓN Y ANÁLISIS
DE UNA NUEVA DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS DE LA
CADENA TRANSFUSIONAL

Autor: IÑAKI URANGA HERRANDORENA

Tutor: DR. JOSUÉ PAGÁN ORTIZ

Cotutor: DR. JOSÉ LUIS RISCO MARTÍN

Departamento: DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Miembros del tribunal

Presidente: D.

Vocal: D.

Secretario: D.

Suplente: D.

Madrid, a de de

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN



TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Desarrollo e implementación de
un simulador de hemovigilancia
para optimización y análisis de
una nueva descripción de los
procesos de la cadena
transfusional**

IÑAKI URANGA HERRANDORENA

18 DE JUNIO DE 2020

Resumen del proyecto

Resumen

En los últimos 15 años el mercado de los productos médicos derivados del plasma (PMDP) ha experimentado un marcado auge en su popularidad dentro del sector farmacéutico. El plasma puede ser obtenido de dos formas: por plasmaféresis o donación directa, o por fragmentación de la sangre total extraída del donante. La primera alternativa requiere equipamiento específico y personal cualificado, es lenta y cara, aunque la más eficiente de las dos opciones. La segunda representa la alternativa económica, pero la menos eficiente, pues solo en torno al 45 % del líquido extraído de un donante es plasma. A nivel mundial, desde los bancos de sangre se está requiriendo de la donación de más sangre total para incrementar la producción de plasma, con la repercusión y relevancia que implica en todos los ámbitos. Por tanto, la necesidad de cumplir con los niveles de demanda de plasma aumenta el número de donaciones (donantes) requerida, este incremento de donaciones genera un mayor stock de derivados que en su gran parte no son demandados (hemoglobina o plaquetas) y cuyo stock muchas veces puede acabar caducándose.

Estas ineficiencias han de solventarse, por motivos éticos y de eficiencia de los centros. Tradicionalmente el proceso de hemodonación se ha dividido en cuatro procesos: planificación, donación, transporte, y fraccionamiento y transfusión. Dado que realmente hay numerosos procesos intermedios relevantes, la aproximación se perfila parca. Con este motivo, estudios de investigación del Centro Regional de Hemodonación de Murcia proponen la redefinición de los procesos de la cadena transfusional con el objetivo de optimizar cada ineficiencia pero enmarcadas dentro de una perspectiva holística del escenario. Dada la magnitud de la propuesta, los costes asociados, el personal requerido, los largos plazos de ejecución y la necesidad de resultados demostrables, la solución deberá ser implementada de forma gradual.

Es por ello que, en este TFM, se ha desarrollado la infraestructura de simulación e implementado el diseño de un nuevo modelo de sistema que emula el proceso de hemovigilancia sobre la cadena transfusional. Esta disposición ha permitido la integración de un motor de optimización y una *GUI* para la obtención de planificaciones de colectas óptima, simular el paso de mensajes mediante un servidor desarrollado, y la generación automática de publicidad (póster y mensajes usando *bots* de Telegram) para hacer más eficiente el trabajo de publicidad de los centros de donación.

Se ha desarrollado un simulador DEVS en Java, y se ha trabajado junto con el Centro de Hemodonación de la Región de Murcia.

Con todo ello, se logra un sistema de simulación que abarque la nueva definición de la cadena transfusional y la incorporación del desarrollo de nuevos modelos predictivos y de optimización. La experimentación con esta propuesta abre la posibilidad de estudio de diversas combinaciones y escenarios que de otra manera serían inconcebibles y brinda la oportunidad de introducir sistemas SW y HW reales, así como humanos, para la integración paulatina posterior de los nuevos estudios.

Abstract

In the past 15 years, the market for plasma-derived medical products (PMDP) has experienced a marked boom in popularity within the pharmaceutical sector. Plasma can be obtained in two ways: by plasmapheresis or direct donation, or by fragmentation of the whole blood drawn from the donor. The first alternative requires specific equipment and qualified personnel, it is slow and expensive, although the more efficient of the two options. The second represents the economic alternative, but the least efficient, since only around 45 % of the liquid extracted from a donor is plasma. Worldwide, blood banks are requiring the donation of more whole blood to increase plasma production, with the repercussion and relevance it implies in all areas. Therefore, the need to meet plasma demand levels increases the number of donations (donors) required, this increase in donations generates a greater stock of derivatives that are largely not in demand (hemoglobin or platelets) and whose stock many times it can end up expiring.

These inefficiencies have to be solved, for ethical and efficiency reasons of the centers. Traditionally, the hemodonation process has been divided into four processes: planning, donation, transportation, and fractionation and transfusion. Since there really are numerous relevant intermediate processes, the approach is shallow. For this reason, research studies from the Murcia Regional Hemodonation Center propose the redefinition of the processes of the transfusion chain with the aim of optimizing each inefficiency but framed within a holistic perspective of the scenario. Given the magnitude of the proposal, the associated costs, the personnel required, the long execution times and the need for demonstrable results, the solution should be implemented gradually.

That is why, in this TFM, the simulation infrastructure has been developed and implemented the design of a new system model that emulates the hemovigilance process on the transfusion chain. This arrangement has allowed the integration of an optimization engine and a textit GUI to obtain optimal collection schedules, simulate the passage of messages through a developed server, and the automatic generation of advertising (poster and messages using textit bots from Telegram) to make the advertising work of donation centers more efficient.

A DEVS simulator has been developed in Java, and it has been worked together with the Hemodonación Center of the Region of Murcia.

With all this, a simulation system is achieved that covers the new definition of the transfusion chain and incorporates the development of new predictive and optimization models. Experimentation with this proposal opens up the possibility of studying various combinations and scenarios that would otherwise be inconceivable and offers the opportunity to introduce real SW and HW systems, as well as human ones, for the gradual integration of new studies.

Palabras clave

hemovigilancia, simulación, DEVS, optimización, transfusión

Keywords

hemovigilance, simulation, DEVS, optimization, transfusion

Agradecimientos

Agradecer a mis padres el enorme esfuerzo y sacrificio que tan desinteresadamente han invertido en mí. Por el empeño y esmero dedicados en la construcción y salvaguarda de los ideales que os representan. A día de hoy puedo reconocer, abiertamente y con orgullo, que sois mi mayor referente y mi más apreciada e inestimable fuente de inspiración.

Agradecer a Edu, Alberto, Carlos, Pablo y Minerva su ayuda en la convivencia del día a día.

Para concluir, agradecer a Josué Pagán su consejo y guía a lo largo del desarrollo de este trabajo. Has adoptado un papel más de compañero que de tutor y lo valoro enormemente.

Gracias.

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, y al asesoramiento de José Luis Risco.

Lista de Acrónimos

API	Aplication Programing Interface
BDC	Blood Donation Center
BDSC	Blood Donation Supply Chain
CM	Contract Manufacturer
CRHM	Centro Regional de Hemodonación de Murcia
CRM	Customer Relationship Management
CSV	Comma-Separated Values
DASS	Digital Avertising System Simulation
DDBB	Data base
EBSN	Event -Based Social Networks
FIFO	First In First Out
FN	Falso negativo
FP	Falso positivo
GUI	Graphical User Interface
HIL	Hardarw-In-The-Loop
HW	Hardware
IP	Internet Protocol
JAVA	Just Another Vague Acronym
JSON	JavaScript Object Notation
LGPL	Lesser General Public License
LIFO	Last I Last Out
NFP	Not-For-Profit

PC Personal Computer

PDF Portable Document Format

PDMP Plasma Derived Medicinal Products

P2P Peer To Peer

RFID Radio Frequency Identification

RRHH Recursos humanos

SDL Specification and Description Language

SIL/SITL Software-In-The-Loop

SDL Specification and Description Language

SNS Social Network Service

SVD-MFN Singular Value Decomposition with Multi-Factor Neighbor- hood

SW Software

SysML System Modeling Language

TBU Total Blood Unit

TFM Trabajo de Fin de Máster

UML Unified Modeling Language

URL Uniform Resource Identifier

WBSN Wireless Body Sensors Network

XML Extensible Markup Language

Índice general

Resumen del proyecto	I
Agradecimientos	V
Lista de Acrónimos	IX
1. Introducción y objetivos	1
1.1. Motivación	1
1.2. Introducción	2
1.2.1. Paradigma de la hemovigilancia	3
1.2.2. Enfoque tradicional de BDSC	4
1.2.3. Definición alternativa de BDSC	6
1.3. Modelado y simulación de procesos	16
1.4. Objetivos	17
2. Estado del arte	19
2.1. Simulación de sistemas industriales	21
2.1.1. Planificación	21
2.1.2. Campañas de promoción y publicidad	22
2.2. Simulación de sistemas del cuidado de la salud	26
2.3. Simulación de sistemas de BDSC	28
2.4. Fundamentos teóricos	30
3. Metodología	35
3.1. Marco general	35
3.2. Modelo conceptual	37

3.2.1. Modelo de comunicación	45
3.3. Formalización DEVS del modelo conceptual	57
3.3.1. Modelos acoplados	57
3.3.2. Modelos atómicos	60
4. Set-up experimental	73
4.1. Motor de optimización	74
4.2. Graphical User Interface	74
4.3. Telegram API	75
5. Resultados	77
6. Conclusiones y líneas de futuro	81
6.1. Conclusiones	81
6.2. Líneas futuras	82
Bibliografía	90
I Anexos	91
Diseño del póster promocional	93
Anexo: Aspectos éticos, económicos, sociales y medio ambientales	95
Anexo: Presupuesto económico	97
Presupuesto de ejecución material	97
Presupuesto de recursos materiales	97
Costes de mano de obra	98
Coste total de los recursos	98
Gastos generales y beneficio industrial	98
Presupuesto total	98

Índice de figuras

1.1. Definición tradicional de hemovigilancia	4
1.2. Definición nueva de hemovigilancia	6
3.1. Esquema de los actores que conforman el entorno del simulador	36
3.2. El modelo RootCoupled es el marco de simulación y alberga todos los modelos acoplados y atómicos del sistema.	38
3.3. Diagrama del ejemplo de la división del proceso total del EFRootcoupled en fases	42
3.4. El modelo EFHTTPServerSender emula el cliente web que aloja la <i>GUI</i>	58
3.5. Mensaje mostrado en al consola del programa <i>Eclipse</i> con la configuración por defecto del simulador y la confirmación de las conexiones	59
3.6. El modelo Scheduler alberga el motor de optimización y elabora las planificaciones de las colectas	59
3.7. El modelo Advertiser genera el contenido publicitario y propagandístico de promoción de colectas	60
5.1. Ejemplo muestra del resultado de algunas de las colectas propuestas por el optimizador	77
5.2. Representación de la tabla de la base de datos con los registros de la propuesta	78
5.3. Representación de la tabla de la base de datos con los registros de los comandos	78
5.4. Ejemplo de mensaje promocional de una colecta enviado al público por Telegram	78
1. Ejemplo del diseño del póster promocional de una colecta (tamaño <i>DIN A3</i> y formato <i>PDF</i>), resultado de la validación de una colecta y generado automáticamente por el Advertiser	94

Índice de cuadros

2.1. Comparativa entre simuladores comerciales para el cuidado de la salud	28
3.1. Información relativa a la cada colecta que maneja el simulador . . .	46
3.2. Información relativa al turno de la colecta	46
3.3. Información relativa a la predicción de la colecta	48
3.4. Información de colecta enviada a la <i>GUI</i>	49
3.5. Información de respuesta de la <i>GUI</i>	49
3.6. Información almacenada en la base de datos y formato de la misma .	50
3.7. Información y formato de colectas almacenadas en un <i>CSV</i> (i) . . .	62
3.8. Información y formato de colectas almacenadas en un <i>CSV</i> (ii) . . .	62
1. Presupuesto de los recursos materiales	97
2. Coste de mano de obra	98
3. Coste total de los recursos	98
4. Gastos generales y beneficio industrial	99
5. Honorarios y presupuesto total	99

CAPÍTULO 1

Introducción y objetivos

1.1. Motivación

Actualmente es posible encontrar en la literatura numerosos estudios y simuladores que tratan los diferentes aspectos asociados al BDSC y al sistema de hemovigilancia asociado, sin embargo, la inmensa mayoría se han enfocado en un aspecto en particular y no en el conjunto al completo. Es verdad que existen ciertas soluciones (ver Capítulo 2) que tratan bajo una perspectiva holística el diseño de soluciones en el ámbito del cuidado de la salud, pero tratándose de un sistema de optimización de ineficiencias, la existencia de pequeñas desviaciones e inexactitudes asociadas a la adopción de soluciones generales dentro del campo del cuidado de la salud justifican por si mismas la reinterpretación y diseño de una solución personalizada.

La razón de esta afirmación es que dentro del cuidado de la salud solo se trabaja con la BDSC y el sistema de hemovigilancia que la supervisa, algunas soluciones abarcan demasiados aspectos que no son de interés. Alguno de los procesos que componen el sistema de hemovigilancia son muy particulares y no pueden ser modelados automáticamente a partir de otro modelo de un proceso que se presupone similar.

Esta solución va a ser usada por el CRHM cuyo sistema sanitario tiene unas características muy concretas, si ya de por sí una solución particular es compleja de definir, una solución que de respuesta a todo los sistemas posibles globales es una tarea inabarcable, además que contradice la motivación principal de este análisis, obtener una solución lo más adaptada a las circunstancias y, por tanto, óptima para el CRHM. Todo avance en una dirección generalista aleja la solución de la posibilidad de alcanzar su objetivo, la optimización holística precisa. En definitiva, cubrir las particularidades inherentes al caso concreto que ocupa al CRHM.

En respuesta a estos requisitos desde el CRHM se propone el diseño y desarrollo *SW* de un simulador de optimización holística propio, que incluya un motor de optimización de planificaciones de colectas (uno de los principales problemas que ocupa el campo de la hemodonación), el cual ya ha sido parcialmente

desarrollado y se encuentra a disposición para ser implementado, y sirva las veces de puente entre dicho simulador y una interfaz de entrono gráfico que también se está desarrollando dentro de esta misma línea de investigación. Estos condicionantes reafirman la necesidad de buscar una solución propia personalizada que permita el trabajo integrado de la interfaz gráfica, el simulador y el motor de optimización.

1.2. Introducción

En los últimos 15 años, el mercado de productos médicos derivados del plasma (PDMP, por sus siglas en inglés) [29] ha experimentado un considerable e incesante auge en su popularidad dentro del sector de la industria farmacéutica [16]. Cada vez es mayor el número de medicamentos que se fabrican con el plasma como compuesto esencial, concretamente, las proteínas [36] que constituyen el plasma que, a su vez, constituye el componente mayoritario de la sangre humana. Se deduce por tanto, que para acceder al plasma es necesario, en primer lugar, disponer de sangre. Aunque existen publicaciones que revelan que se han comenzado a efectuar estudios sobre la obtención de sangre (artificial) mediante procesos de fabricación [35], la tecnología disponible no permite sintetizar sangre aún. Actualmente, la única forma de obtener sangre es a través del proceso de donación voluntaria.

Los PDMP pueden ser adquiridos a varios fabricantes comerciales y sin ánimo de lucro (NFP), o pueden ser fabricados bajo contrato (CM) [25] a partir de plasma suministrado por el gobierno o agencias similares como producto de servicios de transfusión de sangre. Estas entidades gubernamentales aspiran [1] a hacer un uso apropiado y eficiente [28] de los recursos que proveen, así como la implementación de los procesos, mecanismos, políticas y medidas suficientes para asegurar y maximizar el buen uso de las donaciones de sangre/plasma. Así mismo, muchos de estos países aspiran a que su infraestructura llegue a ser autosuficiente en PDMP desarrollando estrategias que desvinculen esta actividad de los designios, caprichos y particularidades del mercado de libre comercio [17]. Los crecientes imperativos comerciales que operan en el sector PDMP entran en conflicto con estas aspiraciones, los procesos competitivos que sustentan estas transacciones, ahora sujetas a las normas internacionales de libre comercio, influyen negativamente sobre las relaciones entre los servicios de sangre y las agencias de fraccionamiento nacionales. En particular, la necesidad de recolectar tantas proteínas (plasma) como sea posible puede generar productos (hemoglobina y plaquetas) que exceden las necesidades nacionales, lo que requiere un paradigma ético para la provisión óptima de dichos productos.

Queda resuelto, por tanto, que la forma óptima de establecer y preservar unos estándares y políticas responsables y eficientes [47], independientes de las dinámicas del mercado abierto global, se cimienta sobre la implantación de un sistema que gestione, controle y supervise todas y cada una de las actividades que comprende la cadena de transfusión, desde la extracción de la sangre hasta la transfusión en sí misma, pasando por el control de calidad.

1.2.1. Paradigma de la hemovigilancia

Estas prácticas quedan recogidas bajo el término hemovigilancia [40]. A grandes rasgos, la hemovigilancia es un sistema de supervisión y alerta, basado en la colección y análisis de los eventos relacionados con la cadena transfusional, con el objetivo de garantizar la seguridad de la sangre y sus derivados. Para la consecución de estos objetivos, la hemovigilancia abarca: selección de donantes, incidencias durante la donación, problemas en la analítica de las donaciones, fallos del sistema de fraccionamiento, pruebas pretransfusionales, administración de la transfusión y seguimiento inmediato y posterior del receptor. De esta forma el sistema asegura maximizar el uso óptimo de las donaciones logradas, caracterizando los errores cometidos, para posteriormente ejecutar análisis forenses y, finalmente, poder efectuar previsiones futuras.

A todas luces se aprecia que el sistema está diseñado para asegurar que cada donación hecha se convierte en una transfusión efectiva (expresado mundanamente y *grosso modo*). Del mismo modo y con la misma sencillez, se extrae la limitación propia de este enfoque. Esta definición del proceso de hemovigilancia no tiene en cuenta la demanda, ni la cantidad o características de la misma (sangre total o solo plasma). Está orientado al aprovechamiento eficiente seguro y controlado de los recursos disponibles, pero obvia la consecución de esos recursos a partir del análisis de la demanda. La hemovigilancia se encarga de evitar que una donación con problemas (enfermedad, mala conservación...) llegue al receptor. Esta trazabilidad entre donante y receptor es denominada *vein-to-vein* y no siempre es posible conseguirla. Según Andrés F. Osorio *et al.* afirman en una de sus publicaciones [44], que “an efficient blood supply chain should meet demand while at the same time reducing wastage and minimising costs”, traducido al castellano, que “una cadena de suministro de sangre eficiente debe satisfacer la demanda al tiempo que minimiza el desperdicio y los costes”. La planificación de la recogida de la sangre es tan importante como asegurar que el sistema planifica el uso de la sangre de forma óptima. Puede parecer una afirmación simple, directa y natural, sin embargo, a continuación se muestra un razonamiento que permitirá al lector elaborar una imagen de dimensión adecuada y adquirir la capacidad de otorgar a la planificación de las donaciones la importancia y entidad que el proceso reclama.

El plasma, si no se adquiere mediante un modelo transaccional de operaciones en el libre mercado, se puede obtener de dos formas (ambas son diferentes vertientes válidas del procedimiento de donación): por plasmaféresis o donación directa, o por fragmentación [54] de la sangre total extraída del donante. La primera alternativa requiere equipamiento específico y personal cualificado y, aunque es la más eficiente de las dos opciones, es lenta y cara. La segunda representa la alternativa económica, pero la menos eficiente, pues solo en torno al 45 % del líquido extraído de un donante es plasma. A nivel mundial, desde los bancos de sangre se está requiriendo de la donación de más sangre total para incrementar la producción de plasma, con la repercusión y relevancia que implica en todos los ámbitos. Por tanto, la necesidad de cumplir con los niveles de demanda de plasma aumenta el número de donaciones (donantes) requerida. Este incremento de donaciones genera un mayor aprovisionamiento de derivados que en su gran parte no son demandados

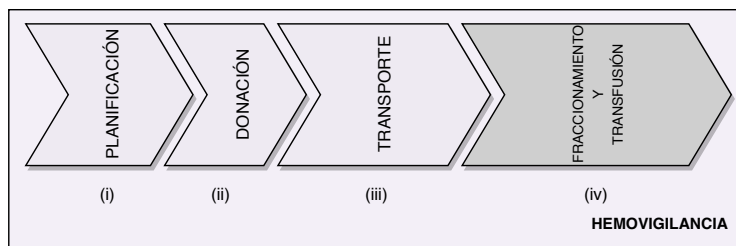


Figura 1.1: Esquema representativo de la estructura de procesos definida para la caracterización del proceso de hemovigilancia

(hemoglobina o plaquetas) y cuyo stock mucha veces puede acabar caducando. Estas ineficiencias han de solventarse, por motivos éticos y de eficiencia de los centros.

1.2.2. Enfoque tradicional de BDSC

Tal y como afirma Barbolla [11], "La hemoterapia es una parte de la medicina que se ocupa del tratamiento de diferentes cuadros clínicos mediante el empleo de sangre o sus derivados como medio terapéutico... Su campo de acción comprende la obtención de la sangre en condiciones óptimas, procesamiento, administración y el estudio de sus acciones beneficiosas y adversas. Para llevar a cabo estas funciones, es necesario desarrollar un conjunto complejo de actividades que han experimentado un gran desarrollo implicando áreas diversas de la medicina y otras ciencias y ha dado lugar a la medicina transfusional". En efecto, la cadena transfusional es la secuencia de acciones necesarias para poder llevar a cabo una transfusión, abarca desde el momento de la extracción hasta que tiene lugar la transfusión. A partir de esta definición se ha desarrollado el concepto de Cadena de Suministro de Donación de Sangre, o en inglés Blood Donation Supply Chain. Esta definición abarca no solo las acciones de la cadena transfusional, sino aquellas otras que son necesarias para establecer las colectas de donaciones y aquellas para convocar donantes.

Hasta el momento, para afrontar los retos subyacentes en el abastecimiento de recursos y en el uso de los mismos de forma impecable y eficiente, el proceso de hemodonación se ha dividido, tradicionalmente, en cuatro procesos (ver Figura 1.1): *Planificación*, *Donación*, *Transporte* y *Fraccionamiento y Transfusión*.

A continuación, se describen brevemente estos procesos.

Planificación

Abarca todo lo referente a la organización y, como su propio nombre indica, a la planificación de las colectas, es decir, todo el trabajo previo al ejercicio de la donación (extracción de sangre). Se centra en establecer las campañas de donación según fechas, horarios y localidades y el anuncio de dicha información.

La extracción de sangre se debe realizar en lugares habilitados al efecto, que contengan las condiciones de higiene, seguridad y salubridad suficientes, así como el

equipo médico imprescindible. Estos lugares se denominan puntos de extracción de forma genérica y los hay de dos tipos: fijos y móviles. Dentro de los fijos están los hospitales y los centros de salud (disponibles de forma permanente) y dentro de los móviles (disponibles temporalmente) se encuentran empresas, centros académicos, centros de salud de pueblo, *etc.* A los puntos móviles es necesario no solo desplazar el equipamiento médico si no al equipo humano profesional pertinente, por lo general, los medios dispuestos al efecto son autobuses(en su defecto, unidades móviles de inferior tamaño). En ocasiones los puntos de extracción móviles no son lugares temporalmente habilitados, sino que son las propias unidades móviles de transporte las que hacen las veces de punto de extracción se denominan vehículos medicalizados.

Donación

Este proceso abarca desde que el donante se presenta en el punto de extracción hasta que se la sangre queda embolsada. Tendría en cuenta tanto la revisión de la documentación personal del voluntario, como el examen médico de su condición de salud, la extracción de la sangre, el embolsamiento y etiquetado de la misma y finalmente su almacenamiento, provisional en la unidad móvil de extracción si el punto de extracción es temporal.

En los puntos de extracción fijos el proceso la donación difiere en ciertos puntos. En este caso la llegadas no están tan orquestadas como en el caso de los puntos móviles. En el caso de los puntos fijos el donante puede presentarse en cualquier momento ya que todo el equipo médico esta disponible. Y no es necesario un almacenamiento temporal de la sangre ni los cuidados que ello requiere, sino que el punto de almacenamiento es definitivo.

Transporte

Tiene en cuenta tanto el desplazamiento de las unidades sanitarias al punto estipulado para la extracción, como el transporte de las donaciones hasta los centros de transfusión. Aspectos el como número de profesionales sanitarios, tipos de vehículos de transporte y extracción, material sanitario y la cantidad de bolsas de sangre máximas que puede ser transportadas son gestionados en este área.

Fraccionamiento y Transfusión

Abarca lo relativo al procesado de las donaciones. Tiene en cuenta el control de las condiciones sanitarias en las que se encuentra el material (sangre libre de enfermedades), el fraccionamiento en sí de la sangre en subproductos, denominados hemoderivados (plasma, hemoglobina y plaquetas), la distribución de estos hemoderivados y el transporte adicional asociado a dicha distribución (cuando es necesario) y, por último, contempla la propia intervención clínica en la que se ejecuta la transfusión al afortunado receptor y el seguimiento de la aceptación de la misma por el sistema de defensas del transfundido.

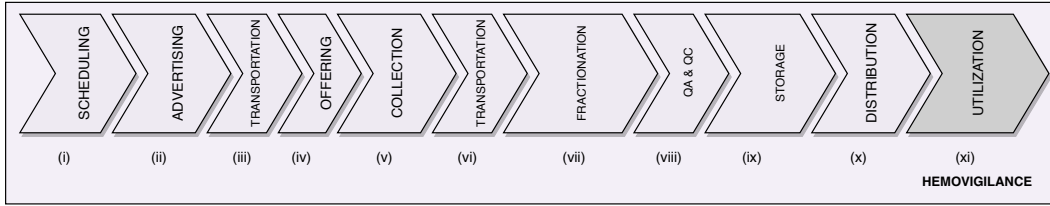


Figura 1.2: Esquema representativo de la estructura de procesos propuesta para la caracterización del proceso de hemovigilancia

Bajo esta definición tradicional del paradigma, los esfuerzos se han centrado en la citación de donantes [3] (de suma importancia en escenarios de crisis sanitarias), reducción del tiempo entre que el donante llega al punto de extracción hasta que abandona el mismo (mediante aplicación de teoremas de colas y modelos de llegadas de Markov [20]), en el control del nivel de ocupación de la capacidad de los almacenes [57] (evitar exceso o déficit de productos sanguíneos) y en la minimización del desperdicio de bolsas y solicitudes innecesarias procedentes de hospitales [33].

1.2.3. Definición alternativa de BDSC

Dado que realmente hay numerosos procesos intermedios relevantes que no están siendo considerados, la aproximación tradicional se perfila parca. Estructurar todo el sistema de hemovigilancia según un criterio de clasificación basado en generalismos asociativos no es adecuado si el objetivo es la optimización holística del conjunto total de pequeñas particularidades. Todos los procesos que intervienen son de naturalezas muy distintas y diversas. Las consideraciones que se tienen a la hora de abordar un proceso y las suposiciones que se realizan en consecuencia, no pueden ser aplicadas de forma sistemática a todos los procesos. Cabe la posibilidad de que dos o más procesos compartan o tengan algún aspecto en común, pero se tratarán de excepciones y no de la norma general.

Con este motivo, estudios de investigación llevados en colaboración por el grupo en el que se realiza este Trabajo Fin de Máster y el Centro Regional de Hemodonación de Murcia (CHRM) proponen la redefinición de los procesos de la cadena transfusional con el objetivo de optimizar cada ineficiencia pero enmarcadas dentro de una perspectiva holística del escenario. Dada la magnitud de la propuesta, los costes asociados, el personal requerido, los largos plazos de ejecución y la necesidad de resultados demostrables, la solución deberá ser implementada de forma gradual. Por ello, el objetivo de este trabajo es el desarrollo de un simulador que permita probar la eficacia de la propuesta y posibilite un despliegue gradual.

Este simulador se describe de forma detallada en el Capítulo 3, a continuación, se desglosa la definición del nuevo paradigma.

De forma análoga al enfoque tradicional, a continuación se describe la estructura de procesos propuesta como alternativa a la tradicional definición. Desde un punto de vista conceptual, el cronograma (ver Figura 1.2) de la cadena de suministro de donación de sangre (*BDSC*, acrónimo del inglés *Blood Donation Supply*

Chain) se clasifica según la contribución de cada proceso en la consecución de los diferentes objetivos principales: captación de donantes, extracción de sangre y procesamiento de dicha sangre. En consecuencia, tenemos tres agrupaciones de procesos: aquellos que se desarrollan previa ejecución de la oferta de la candidatura del donante (ver *Offering* en Figura 1.2), aquellos vinculados al ejercicio de la donación/extracción (véanse *Offering* y *Collection* en la Figura 1.2) y, por último, todos los que engloban el procesado de la sangre, su transporte, almacenamiento, distribución y transfusión final (*Transportation*, *Fractionation*, *QA & QC*, *Storage*, *Distribution* y *Utilization*, respectivamente).

Los procesos se ejecutan en cascada una vez se efectúa el *Offering*. Sencillamente, la ejecución de un proceso desencadena la ejecución del siguiente ininterrumpidamente (efecto dominó) y de forma irreversible hasta que todos los procesos se han sido ejecutados. La mayoría de los centros de donación (*BDC*, acrónimo del inglés *Blood Donation Center*) solo tienen control sobre los procesos del segundo conjunto.

A pesar de que esta propuesta alternativa para la definición de la arquitectura de los procesos implicados en la BDSC se postula como una versión más concisa y orientada al detalle, cada proceso se articula en base a otro conjunto de subprocesos. Es decir, se mantiene cierto nivel de abstracción dado que una aproximación orientada a un nivel lo más descriptivo posible desembocaría en una tarea de dimensiones titánicas. Se apuesta por establecer un procedimiento escalable, a través del cual entrar paulatinamente en niveles de detalle superiores conforme se estime necesario y más prioritario. El concepto de priorización es más relevante de lo que se podría apreciar a priori. Los problemas de optimización de algunos procesos ya han sido tratados anteriormente [52], sin embargo, hasta el momento la integración de los mismos y sus ineficiencias en una solución de optimización holística no ha tenido lugar. Así lo expresan Osorio *et al.* [44], quienes también destacan, tal y como se ha mencionado en secciones anteriores, que la mayoría de los movimientos, en el sentido de optimización, han sido dirigidos y orientados a los procesos de la BDSC posteriores al *Offering* (consultar Figura 1.2).

Dado que se trata de la redefinición de un paradigma originada de la necesidad de optimizar la BDSC bajo una perspectiva holística, optimización de cada proceso por separado teniendo en cuenta la repercusión en el resto de procesos de la cadena, se han considerado las pérdidas de eficiencia dentro de la misma definición como errores. Es por esto que junto con la descripción de cada proceso es posible encontrar el análisis descriptivo de dichos errores (en los procesos que procede).

A continuación, se describen los procesos que el grupo de investigación, en el que se desarrolla este proyecto, ha desgranado, con el fin de que sirvan de base teórica para el objetivo de este trabajo.

Planificación (*Scheduling*)

La planificación es el proceso a través del cual se seleccionan puntos donde se efectúen las extracciones. Generalmente este proceso se ejecuta con

suficiente antelación (de uno a dos meses) al desarrollo de la propia extracción. Esta anticipación permite asegurar y confirmar la disponibilidad de los puntos de extracción, como puedan ser centros educativos o espacios públicos, para ser habilitados al efecto en la fecha y horario estipulados. Así mismo, es posible asignar el personal sanitario necesario junto con su calendario de trabajo, como el resto de recursos indispensables (unidades móviles, equipo especializado para la aféresis). Este proceso hace las veces de pie para el proceso publicitario (*Advertising*), ya que permite poder planificar la difusión del evento.

Es uno de los procesos más críticos, ya que de él dependen el resto de procesos y la influencia asociada al error en esta etapa abarca el sistema al completo. Esto es así debido a que las planificaciones se hacen en base a la satisfacción de cierta demanda y a las previsiones de nivel de aprovisionamiento (óptimo necesario) en los almacenes embebidas en el intento. El error, por tanto, se caracteriza como la diferencia entre el número de donantes que se esperan frente al número de donantes que finalmente hacen acto de presencia en el punto de extracción.

Un aspecto muy importante—que por lo general suele ser obviado en la planificación—es la importancia de segmentar la población objetivo a la que esta dirigida la campaña y caracterizar dicho segmento de la población. Tiene un efecto directo sobre el proceso de publicidad. Actualmente, se cuentan con numerosos y muy diversos medios de comunicación. La disponibilidad de los canales de contacto varía según el tipo de localidad en la que se encuentra la población objetivo. La falta de atención en este sentido es susceptible de desembocar en una campaña de difusión y contacto ineficientes.

Otro punto a tener en cuenta, trata de las condiciones sobre las que se convocan a los potenciales donantes. Por ejemplo, puede tratarse de una convocatoria libre de citas preestablecidas (definidas con anterioridad) o puede tratarse de una convocatoria basada en una agenda de citas, mediante la cual convocar a cada donante en el punto de extracción a una hora determinada. Una mala disposición puede derivar en pérdidas de donaciones debido a que una llegada masiva de donantes aumenta en exceso el tiempo de espera para ser atendido, provocando que donantes desistan en su intento por colaborar.

En este punto ya se puede percibir el potencial efecto desencadenante de un error. La suma agregada de un error en la planificación junto con una imprecisión en la previsión fuerzan otra inexactitud en un proceso posterior acentuando, por momentos, la desviación del intento de aproximación del resultado óptimo ideal.

Publicidad (*Advertising*)

Se ha adelantado ya que los donantes no siempre son citados según un único sistema, la forma en la que los mismos son citados tampoco es siempre la misma. Cada país tiene su propia política al respecto, llegando en algunos casos a remunerar el gesto, aunque no es el caso de Europa. En consecuencia, las medidas para la difusión de las colectas son adaptadas a las circunstancias y necesidades.

El proceso de promoción consiste en dar a conocer, al mayor número

de personas posibles, las colectas establecidas en el proceso de planificación, dicho en otras palabras, hacer llegar la información relativa a dichas colectas al mayor número posible de personas. Para el normal desarrollo de la colecta—como evento/convocatoria, no como concepto de donación de sangre—se entiende como información esencial e indispensable: la localización donde se celebra la colecta, el centro de salud donde se efectuará, la fecha y el horario de la misma. En ocasiones, es posible que se requieran ciertos documentos personales y legales del donante, por ejemplo, suelen ser requisito para poder identificar al donante, o cabe la posibilidad de contar con equipo específico de extracción de plasma. Cualquier solicitud de esta naturaleza, de ser necesaria, por motivos prácticos obvios se entiende como información imprescindible que debe comunicarse a los potenciales donantes.

Estos datos esenciales para el éxito de la convocatoria no solo son necesarios para los donantes, sino que también son prácticos desde el punto de vista de la organización. Partiendo de los datos mencionados en el párrafo adyacente, una buena organización establecerá y definirá los preceptos de una campaña de publicidad eficiente. No es una tarea sencilla, tras analizar las características de la colecta pertinente se debe establecer, en primer lugar, el tipo de canal publicitario que se adapte al objetivo a alcanzar y, en segundo lugar, el tipo de medio de comunicación. Se tiene entonces que decidir si la campaña será de difusión (*broadcasting*) o punto a punto (*P2P*), para después, resolver entre radio, televisión, redes sociales, portales web y megafonía o, entre cartelería, buzoneo y plataforma de mensajería instantánea, si se trata de *broadcasting* o *P2P* respectivamente.

La anterior clasificación enmascara una tercera categoría, un nivel de definición más preciso, el cual si se tiene en cuenta y se incluye como un aspecto más de la planificación de la campaña, acercaría la concepción del sistema de BDSC aún más a la solución final óptima. Todos los medios de comunicación listados, tanto los de tipo *broadcasting* como los de tipo *P2P*, pueden ser clasificados según si pertenecen al conjunto de medios de comunicación tradicionales o al conjunto de medios contemporáneos (modernos). Sin llegar a ser un aspecto sumamente crítico, no es posible negar la importancia del mismo, dependiendo de la localidad y la población objetivo implementar un medio u otro puede contribuir de forma positivo al rendimiento efectivo de la campaña. En algunos casos es posible incluso encontrar que el medio más adecuado a las necesidades no se adecuaba a las circunstancias, es decir, no está disponible. Este razonamiento refuerza la idea de otorgar más relevancia y atención a la segmentación demográfica de la población, con el fin de lograr un objetivo claro y delimitado sobre el que definir toda la campaña publicitaria.

Si esta premisa se entiende como válida, entonces, es factible formular una hipótesis aún más elaborada. Se supone que la definición de un público objetivo en términos demográficos y que la caracterización de la campaña entorno a esta definición influyen de forma positiva la eficiencia del proceso de hemovigilancia sobre la BDSC. El diseño de una campaña conforme si el objetivo es la captación de nuevos donantes o el contacto de donantes recurrentes, partiendo del punto anterior, aportará un escalón más a la consecución del potencial máximo de optimización del proceso de hemovigilancia.

Si la hipótesis anterior es cierta, se tienen marcadas diferencias en la planificación de la agenda de citas. Si los convocados son donantes regulares—por lo menos han donado una vez y han expresado de forma clara que desean seguir con la contribución en posteriores ocasiones, estas personas son registradas en un base de datos para ser contactadas posteriormente—, por un lado, el esfuerzo publicitario es mínimo, por otro lado, las citas se establecen a horas concretas y se asigna la duración de estas (se estipula la misma para todas y cada una de las citas). Para ello, se tienen en cuenta las horas de trabajo del personal médico-sanitario y las preferencias de los propios donantes. Las pérdidas de donaciones porque la espera en cola provoca que el donante desista en el intento son casi nulas, lo que convierte este método en una alternativa eficiente. Si los convocados no son exclusivamente los asiduos no se establecen citas previas (se estima su eventual llegada) y se tiende a recurrir a todos los medios de comunicación disponibles para soportar una campaña de difusión masiva generalista. La disposición de este escenario no ha sido analizada en profundidad, dando pie al inicio de interesante líneas de investigación [42].

En el caso de este proceso el error que se puede cometer se define como la diferencia entre el número de individuos contactados y el número de estos individuos que se presentan en el punto de extracción. La tarea de caracterizar el origen de estas desviaciones (errores) es actualmente imposible (más allá de meras suposiciones). En este punto es importante contar con un histórico contable de planificaciones y campañas para poder con el tiempo efectuar previsiones más precisas. Ya que no se puede definir con exactitud la causa del error, el trabajo se debe centrar en reducir la posibilidad de reproducción del mismo. En resumidas cuentas, comprobar qué funciona y qué no.

Transporte (*Transportation*)

Como puede apreciarse en la Figura 1.2 el proceso de transporte aparece dos veces. Esto se debe a que ambas instancias comparten una naturaleza común, pero los aspectos que los diferencian, en términos de optimización, se atacan de formas diferentes. Para entender este razonamiento, es necesario conocer la descripción de ambos procesos.

La primera vez que toma lugar el proceso de transporte se refiere al conjunto de acciones cuyo desarrollo permiten trasladar al personal médico y el equipo técnico sanitario desde los centros de donación de sangre a los puntos de extracción. Dependiendo del sistema de extracción, este proceso alberga la responsabilidad de establecer rutas óptimas, adecuadas según distancia, tiempo, *etc.*

En algunos países, las unidades móviles siguen un plan itinerante. En el caso de España, generalmente, solo se requiere el desplazamiento a un único punto de extracción y el retorno de dicha unidad al centro de donación de sangre para el fraccionamiento y almacenamiento de la sangre extraída, lo que orienta la explicación al segundo de los procesos de transporte.

La segunda vez que toma lugar el proceso de transporte (ver Figura 1.2 (vi)) se refiere al conjunto de acciones mediante las cuales se logra trasladar la unidad

de extracción móvil, desde el punto propio de extracción, de vuelta al centro de hemodonación. La principal diferencia con respecto al caso anterior es que esta vez se transportan las bolsas de sangre (*TBU*, acrónimo del inglés *Total Blood Unit*), las cuales deben llegar a los centros de hemodonación pertinentes en un periodo de tiempo que no exceda las 24 horas, en caso de que el vehículo móvil no cuente con un sistema de refrigeración. En países como Turquía, los vehículos si disponen de refrigeración por lo que los plazos no son tan exigentes.

Para sistemas simples como el implantado en España los esfuerzos analíticos en pos de la búsqueda de la optimización son considerablemente reducidos. Los centros de hemodonación cuentan con ciertas unidades móviles determinadas y no existe la opción de elegir entre tipos diferentes según las necesidades. El hecho de acudir a un solo punto de extracción tampoco exige la disponibilidad de unidades especiales mas allá de la propia habilitación de las mismas para poder alojar la extracción. Por la misma razón, no es necesario un esfuerzo enfocado en la búsqueda de rutas óptimas de desplazamiento ya que en Murcia no se establecen rutas itinerantes, sino desplazamientos diarios puntuales y concretos . En los casos de sistemas en los que si se establecen estos itinerarios sería necesario (casi esencial) tener este aspecto en cuenta a la hora de elaborar la planificación en el proceso de planificación.

El error en este proceso, para el caso del territorio español, se caracteriza, exclusivamente, como las pérdidas por manipulación de las TBUs en el segundo de los procesos de transporte. Se entiende que los fallos en el primero de los procesos no afecta considerablemente al resultado final de la extracción y, en el segundo proceso, los errores son mínimos o casi inexistentes. En sistemas más complejos esta afirmación habría que realizarla con más cuidado y tener la posibilidad de un mayor numero de errores en consideración (tipo de unidad móvil según capacidad de almacenamiento, autonomía, disponibilidad de equipo especializado para extracción por aféresis, rutas de desplazamiento...). Estos razonamientos refuerzan la importancia de disponer de una planificación inicial óptima y arrojan mayor claridad sobre el debate ante los efectos de esta planificación en el resto del sistema.

La mayoría de los puntos que se tratan cuando se redefine el sistema de hemovigilancia giran entorno a la optimización y eficiencia del propio sistema desde el punto de vista del abastecimiento de sangre. Tiene sentido, ya que es el principal objetivo del sistema: ser capaz de planificar un serie de colectas que satisfagan ciertas necesidades. Sin embargo, ciertos objetivos, que también son de fundamental importancia quedan en segundo plano y, en ocasiones, no reciben la atención que deberían. En el caso de este proceso la importancia de controlar los costes asociados a la operativa es crucial.

Aparte de todas las partidas ya nombradas, se debe tener en cuenta que tanto el equipo administrativo como el sanitario y los conductores de la unidad móvil deben ser alimentados. Es costumbre proveer a los donantes de un avituallamiento tras la extracción (tentempié y bebida), con el fin de que los donantes no sufran efectos adversos derivados de la extracción. Por otro lado, se debe tener en cuenta que mucho de los enfermeros desplazados no son parte de la plantilla regular, sino

que estos recursos son reclutados mediante la subcontratación (entiéndase los costes asociados a estas prácticas). Sin entrar en demasiados detalles, es fácil entender la dimensión que los costes llevan asociados, y aunque no sean comentados de forma permanente se ha definido el sistema de hemovigilancia, y así se debe tener en mente, como la solución al paradigma que satisface la demanda de forma eficaz (precisa, sin déficit o exceso de hemoderivados) y eficiente (manteniendo los costes lo más reducidos posible).

Oferta (*Offering*)

Tal y como se ha explicado al comienzo de este mismo capítulo, el ofrecimiento es el proceso frontera que divide el sistema de hemovigilancia en dos. Este proceso alberga las acciones a través de las cuales el donante hace acto de presencia en el punto de extracción y hace entrega de los documentos personales legales pertinentes (solicitud incluida durante la campaña de difusión de la colecta), para su revisión por el administrativo dispuesto al efecto.

En descripciones anteriores se han presentado los dos modelos disponibles para convocar donantes, es en este punto donde se muestran los efectos de la elección de una de estas dos opciones. Si se ha implementado una agenda de citas programadas, la tasa de llegadas será fácil de implementar y analizar (controlar y gestionar), si por el contrario, la convocatoria no ha sido definida en estos términos las llegadas de los donantes serán más erráticas y difíciles de predecir. Por suerte, tampoco es una tarea imposible si se acude a fuentes de información donde poder consultar las costumbres culturales de una región y/o población (incluso al sentido común).

Generalmente, en los casos de poblaciones objetivo conocidas las llegadas se pueden modelar a través de la aplicación del teorema de colas o el modelo de llegadas de Markov. En este escenario es indispensable tratar de evitar aglomeraciones que incrementen el tiempo de espera en exceso, entre el momento en el que el potencial donante se presenta hasta que le es extraída la sangre. Un tiempo de espera excesivo aumenta las posibilidades de que potenciales donantes abandonen el lugar y no procedan con la donación. Este escenario y las circunstancias e implicaciones que lo definen no han sido tratados en profundidad en la literatura publicada hasta la fecha dado que alberga numerosas dificultades y casi insalvables obstáculos. En este sentido se tiene la oportunidad de abrir intensas líneas de investigación que, de llegar a buen puerto, marcarían una gran diferencia y contribución positiva a la eficiencia de la BDSC bajo un enfoque holístico.

La pérdida de donantes y la correspondiente pérdida de TBUs (se habla de forma genérica sobre TBUs ya que las donaciones exclusivas de plasma no son corrientes por una serie de motivos ya descritos con anterioridad) se entiende y, por tanto, contabilizan como errores.

Se considera el trabajo de la primera porción del sistema de hemovigilancia (previa a la publicidad) un éxito cada vez que un donante se presenta en el punto de extracción y que, por tanto, el trabajo de planificación y difusión han sido a su vez exitosos. Cuanto más cerca esté el número de donantes que acuden al punto de

extracción del número de donantes estipulado más eficiente habrá sido esta primera parte del sistema.

La tasa de llegadas y el tiempo de espera en cola no son los únicos puntos de conflicto en este proceso. Hasta este punto los voluntarios son donantes con la dominación adicional “potenciales”, condición de la que se pueden deshacer si logran concluir con éxito un chequeo de dos pasos: uno primero de carácter puramente legal y un segundo, también de carácter legal, pero esencialmente de origen médico. El error en el primero de los chequeos se caracteriza como el número de potenciales donantes que, o bien no han presentado los documentos personales necesarios, o bien los han presentado pero no son válidos por no estar en regla y, en consecuencia, no pueden ser aceptados ni los documentos ni el donante. Estos errores circunstanciales fortuitos no son considerados como importantes.

El segundo de los pasos del chequeo, el cual puede entenderse como un examen médico pertenece al proceso de recolección (*Collection*) que se describe a continuación.

Recolección (*Collection*)

Este proceso comienza con el examen médico del voluntario y acaba con el almacenamiento provisional dentro de la propia unidad móvil. El examen consiste en un conjunto de preguntas en las que preguntan si el voluntario ha estado enfermo recientemente, si padece de anemia, si ha viajado a lugares exóticos susceptibles de poner en peligro sus propias condiciones de salud, *etc*, y en unas pruebas médicas, por ejemplo, la comprobación de los niveles de hemoglobina en sangre.

Este proceso es más delicado de lo que parece a priori, y es que encierra procesos supervisados bajo juicio subjetivo (opinión personal del enfermero) y entra en juego equipo médico que si interviene en la consecución del resultado objetivo. Por un lado, las respuestas del voluntario son procesadas por la mente de un persona la cual va a juzgar, inconscientemente o no, hasta el origen de nacimiento del sujeto en cuestión (potencial donante). Las respuestas que el potencial donante proporciona se basan, obviamente, en la información que posee, lo que no es tan obvio, es tener en cuenta que inconscientemente el sujeto puede padecer de alguna enfermedad y no ser consciente porque, por ejemplo, es asintomático. Por otro lado, se debe tener en cuenta la tolerancia al error natural de cada equipo médico derivada del proceso de fabricación y del propio diseño técnico del equipo. El estado de desarrollo de estos es lo suficientemente maduro como para no suponer marcadas desviaciones.

En este punto ha de hacerse un inciso, dado que se cuenta con al información suficiente para poder explicar un efecto que en este punto se experimenta en toda su dimensión y que afecta de forma directa al éxito de la segunda porción del sistema de hemovigilancia. Todos lo potenciales donantes que han sido descartados erróneamente durante el examen descrito en el ofrecimiento se denominan falsos negativos (FN) y todos aquellos potenciales donantes que por error superan los exámenes médicos descritos en el párrafo inmediatamente superior se conocen como falsos positivos (FP). Los efectos de los FN no se perciben en ningún momento pero

quedan reflejados implícitamente en el resultado de TBUs obtenidos. Los efectos de los FP si se reflejan de forma explícita en un proceso posterior (*QA* & *QC*). La descripción de estos efectos puede ser consultada dentro de la explicación dedicada a dicho proceso. Las consecuencias de este efecto se agravan más dado que, al aparecer, los FN y los FP tienen consecuencias psicológicas negativas en los voluntarios que provocan que estos cesen la práctica de la donación, tal y como demuestran recientes estudios [22].

Enfrentar este efecto y sus consecuencias no es una tarea del todo sencilla, se ha demostrado que ciertos trabajadores más conservadores son propensos a dar FN, mientras que otros son más propensos a dar FP. Una investigación basada en análisis estadísticos comparativos entre la media de FP y FN, frente a los determinados por un solo individuo podría contribuir de forma positiva al aprendizaje del colectivo médico. Se trata de una tarea tediosa más que ardua.

Los procesos de extracción y almacenamiento no están exentos de peligro tampoco, pero se debe tener en cuenta que los problemas son por lo general poco frecuentes. Las metodologías han sido ampliamente desarrolladas y puestas en práctica con detenimiento.

Fraccionamiento (*Fractionation*)

Este proceso es a través del cual se procesan las TBUs y se obtienen los hemoderivados. Se ejecuta de forma paralela a la validación de las donaciones en el proceso *QA* & *QC*.

Los errores se caracterizan como el número de producto procesado resultante del proceso que debe ser descartado. Estos descartes suelen estar originados por condiciones del hemoderivado, por ejemplo, sangre con un nivel excesivo de grasa (existen otros motivos pero su explicación es demasiado técnica y distraerían la atención del lector). Parte de las pérdidas pueden ser previstas si se analizan las características demográficas de los donantes, por ejemplo, la edad. Si durante el proceso de planificación se tienen estos errores en cuenta es posible alcanzar con mayor exactitud los niveles de abastecimiento deseado en los almacenes.

Es muy importante reducir en este punto los errores al mínimo, ya que si no se obtiene el plasma estipulado, en posteriores planificaciones se sobredimensionarán la colectas para suplir estas pérdidas, lo que desembocará a un exceso de otros productos no necesarios que acaban siendo desechados (no es eficiente, ni ético).

Control de calidad (*QA* & *QC*)

Este proceso se encarga de controlar la seguridad de los productos tanto procedente de las extracciones como los resultantes del fraccionamiento. Es en el momento en el que se analizan las extracciones cuando salen a la luz los FP y se revela la magnitud de las consecuencias del efecto anteriormente presentado. Se define como error de procesamiento a la suma de los errores por FP, los errores por FN y los errores de fraccionamiento.

A lo que el control de calidad respecta, los errores se caracterizan como todos los productos que, no cumpliendo los estándares de sanidad y calidad, superan el proceso satisfactoriamente. Estos son intrínsecos a las técnicas implementadas, al número de mecanismos utilizados y a la idoneidad de los mismos.

Almacenamiento (*Storage*)

Es el proceso que mide el nivel de aprovisionamiento de los almacenes. La capacidad y los niveles de ocupación deben ser las principales referencias sobre las que fundamentar las predicciones y la consecuente planificación. Las premisas en este sentido son simples: se debe mantener un nivel de ocupación mínimo requerido por cada centro para poder hacer frente, siempre que las circunstancias lo exijan, a cualquier alerta sanitaria.

Los valores del nivel de ocupación varían según la influencia de dos operaciones: entradas de inventario (donaciones) y salidas de inventario (transfusiones). Por tanto, poseer el control sobre estas variables asegura el mantenimiento de la ocupación dentro de las fronteras. Esta tarea no es tan sencilla, si bien las entradas pueden ser moduladas en cierta medida, estipulando para ello los niveles de hemoderivados necesarios deseados, planificando la colecta de producto y, en definitiva, aprovechando el máximo rendimiento del sistema, por el contrario, las transfusiones escapan al control de la técnica actual (consulta del histórico registrado). El punto de inflexión en este aspecto se encuentra en el desarrollo de un modelo de predicción capaz de prever descensos bruscos en los niveles de abastecimiento, o capaz de predecir la necesidad futura de un hemoderivado en concreto (hematíes, plaquetas, glóbulos blancos y plasma). Partiendo de este modelo podrían desarrollarse otras metodologías de aproximación como la planificación de campañas de donación de grupos sanguíneos concretos.

Los errores en este proceso se caracterizan como el número de unidades de hemoderivados que no pueden ser almacenados por exceso de ocupación y el número de transfusiones que no pueden efectuarse por ausencia del hemoderivado necesario.

Distribución (*Distribution*)

Este proceso es similar a la segunda instancia del proceso de transporte, comprende las acciones que hacen llegar las transfusiones desde el almacén hasta el receptor. Los errores en este caso se caracterizan como todas aquellas unidades que se echan a perder por fallos en la manipulación de las mismas, envíos incompletos o envíos erróneos en los que el pedido distribuido no corresponde con el solicitado.

Al tener este proceso asociados aspectos relativos al transporte, al igual que en otras ocasiones es interesante aproximar la definición y el enfoque a términos de costes. Todas las operativas llevan conllevan en mayor o menor medida costes embebidos. La eficiencia en procesos de esta naturaleza responde a dos objetivos, por tanto, incidir en investigaciones en ellos dará como resultado doblemente satisfactorio.

Utilización (*Utilization*)

Este proceso abarca las acciones que se ejecutan en el momento de efectuar la transfusión. En este punto no se entienden errores como tal las transfusiones que no llegan a ejecutarse de forma efectiva por algún fallo humano de manipulación o similares. Desde el punto de vista de la optimización holística del sistema de hemovigilancia sobre la BDSC, los errores se caracterizan como el número de transfusiones no indicadas.

Desde el Centro de Hemodonación Regional de Murcia, en colaboración con el grupo de investigación donde se desarrolla este trabajo apuestan porque esta propuesta que redefine el alcance del sistema de hemovigilancia, que imprime una nueva dimensión a la BDSC de la literatura clásica, constituye una solución factible y práctica para dar comienzo a numerosas investigaciones en líneas muy diversas. El nuevo paradigma que se presenta, no solo centra su atención en que todas las donaciones recibidas se transformen en trasfusiones efectivas, sino que, además, amplía el enfoque para alcanzar el número concreto de donaciones necesarias. Además, la propuesta de por sí da un paso más incluyendo el concepto de optimización holística, que consiste en la optimización particular de todas y cada una de las ineficiencias bajo la percepción del sistema completo. Con ello, el CRHM no solo busca predicciones de necesidad de abastecimiento precisas, planificaciones de colectas robustas, campañas de difusión personalizadas o una operativa logística oportuna, se trata de lograr estos objetivos singulares mediante el uso de relaciones asociativas de dependencia, o lo que es lo mismo, que el logro de cada objetivo sea la causa y la consecuencia de los restantes logros.

Esta disposición permite crear un ciclo de sinergias idealmente infinito en el que cada iteración resulte en una solución de optimización holística exitosa que, a su vez, sirva de punto de partida para futuras iteraciones. Este concepto aporta un nuevo alcance al concepto de optimización holística, teniendo un sistema que no solo ofrece soluciones óptimas desde una perspectiva holística estacionaria, sino que las propias mecánicas de obtención de dichas soluciones pueden ser optimizadas en sí mismas, logrando así un sistema de optimización holística estacionario-temporal.

1.3. Modelado y simulación de procesos

En este punto, ha quedado evidenciada la magnitud de la solución propuesta y es posible deducir que la implantación de la misma va a requerir del uso de estrategias y políticas de despliegue gradual. Teniendo en cuenta los costes asociados, el personal requerido y los largos plazos de ejecución es comprensible que para la aprobación de la implantación de esta solución propuesta por el CRHM se exija ciertos resultados que avalen dicha implantación y aseguren el éxito de la misma una vez implantada, es decir, será necesario demostrar que el nuevo sistema de hemovigilancia corresponde con la finalidad por la que ha sido concebido.

En efecto, un proceso de hemovigilancia que encierra este nivel de complejidad requiere de un estudio preliminar en el que todas las funciones y requerimientos

considerados estén definidos de forma clara y unívoca. Un vez el sistema es formulado y se diseña, es necesario probar si cumple con los requisitos técnicos y funcionales establecidos.

Es posible hacer una aproximación, a través de la cual experimentar con el ecosistema real, según el caso de uso y las funcionalidades a implantar. Este método permitiría detectar los fallos de diseño, ir depurando y probando de nuevo de forma iterativa. A pesar de que la mejor forma de comprobar la validez del sistema es experimentando en un despliegue real en producción, este sistema esconde peligrosas inconvenientes como son, los costes asociados a cada despliegue, o el peligro que implica las pruebas de prototipos tempranos, como por ejemplo, daños en equipos físicos irreversibles o incluso irreparables.

Por fortuna, existe un método que elimina dichas amenazas. El modelado y simulación de procesos permite virtualizar el ecosistema real, generando un entorno seguro en el cual comprobar el rendimiento del sistema objeto de estudio. Será, por tanto, posible estudiar si el comportamiento es el esperado y, en caso de no serlo, detectar y aislar el motivo, hacer las correcciones consecuentes y volver a comenzar el ciclo de pruebas manteniendo los costes asociados en los valores mínimos posibles.

1.4. Objetivos

En este trabajo se propone el desarrollo e implementación de un sistema de simulación que abarque la nueva definición de la cadena transfusional y la incorporación del desarrollo de nuevos modelos predictivos y de optimización. Esta propuesta abriría la posibilidad de estudio de diversas combinaciones y escenarios que de otra manera serían inconcebibles. Un sistema simulado brinda la oportunidad de introducir sistemas SW y HW reales, así como humanos para la integración paulatina posterior de los nuevos estudios.

- Desarrollo de la infraestructura de un simulador de la nueva propuesta de cadena transfusional.
- Modelado, diseño y desarrollo de los procesos de planificación y promoción de colectas sanguíneas.
- Definición e integración de los restantes procesos para estudios posteriores.
- Sistema integrado en backend con comunicación a una GUI.
- Uso de formalismos de simulación (DEVS).
- Co-simulador HW-SW.

En este primer Capítulo 1 se ha presentado la situación general de la cadena transfusional (BDSC), el paradigma de la hemovigilancia y el caso concreto de este en la Región de Murcia (problemática y solución propuesta) y, por último, los objetivos a lograr con la ejecución efectiva de este proyecto. El resto del documento está

articulado según la siguiente estructura: en el Capítulo 2, se describen brevemente otros simuladores y se realiza un análisis comparativo entre los mismos y, con ello, poder justificar en que se ha inspirado la solución desarrollada en este proyecto. El Capítulo 3 describe la metodología definida para el desarrollo del simulador. Se describe cada elemento que da forma al modelo, así como las interacciones entre ellos. La traducción del modelo a un marco de modelado y simulación se describe en detalle en el Capítulo 4. El Capítulo 5 alberga los resultados de la simulación. Finalmente, en el Capítulo 6, se extraen las principales conclusiones y posibles líneas futuras.

CAPÍTULO 2

Estado del arte

En este capítulo se incluye el análisis de diversas soluciones, disponibles actualmente, que tratan de dar respuesta al paradigma de la hemovigilancia del mismo modo que se hace en este trabajo y, de forma complementaria, pero no por ello irrelevante, se hará un análisis de diferentes formulaciones matemáticas y metodologías que han ayudado a desarrollar la solución. Con esto se pretende recolectar la información y conocimiento suficientes como para asentar una base sólida que permita asegurar que el desarrollo que parta de dicha base fundamental alcanzará el objetivo deseado de la manera más precisa posible (a día de hoy).

A lo largo de todo el documento se incide sobre esta misma idea. Y es que tratándose de la búsqueda de una solución óptima para el estudio del comportamiento del nuevo paradigma de hemovigilancia que, a su vez, es un ejercicio de optimización en si mismo, es necesario establecer que el conjunto de acciones que impulsan el progreso del desarrollo del sistema de simulación, sigan una metodología sistemática adaptada, óptima y estudiada (evitar ejercicios de fuerza bruta) que oriente y dirija el trabajo de forma precisa, hasta la obtención de una infraestructura de simulación que cubra todos los requisitos técnicos y funcionales para el estudio del comportamiento del nuevo paradigma de hemovigilancia—redefinición de la convención tradicional—de la cadena transfusional (BDSC).

Inicialmente, el análisis parte de soluciones para la optimización de sistemas que operan en la industria de carácter general, a continuación, se centra sobre sistemas orientados al cuidado de la salud, finalmente, se enfoca dicho análisis al ámbito de la hemovigilancia.

En este punto es conveniente recordar y reflejar los requisitos funcionales que debe soportar el sistema. Se sabe que el sistema debe ser capaz de gestionar: diversos tipos de localidades con sus respectivas poblaciones (información demográfica) y los medios de los que disponen dichas poblaciones, para resolver los canales de comunicación disponibles efectivos; personal sanitario (calendario profesional, contratación, avituallamiento...); equipamiento técnico (material sanitario general y especializado); aspectos referidos a la logística (aprovisionamiento, rutas, unidades móviles...) entre puntos de extracción y el almacenamiento, *etc.* Junto con otros

ejemplos, estas funcionalidades imprimen al sistema de un marcado carácter industrial que deberá ser analizado dentro del marco del cuidado de la salud y, más concretamente, sobre el paradigma de la hemovigilancia.

Para facilitar la comprensión del lector y guiar a este de forma natural a través del texto, las secciones que conforman este capítulo se han dispuesto y estructurado para reflejar el desarrollo temporal del proceso, y permitir al lector experimentar en primera persona la evolución del análisis, de forma análoga a como este fue ejecutado.

La Sección 2.1 recoge el análisis del estado del arte de las soluciones de optimización de sistemas industriales. Se debe matizar que en ningún momento se ha estimado una solución de estas características como alternativa directa a este trabajo, sino que lo que se ha buscado con este primer estadio ha sido el descubrimiento de convenciones ampliamente adoptadas (pautas, directrices y metodologías del buen hacer), incluso conceptos teóricos desconocidos y/o innovadores potencialmente beneficiosos para este trabajo en particular.

La Sección 2.2 recoge un análisis idéntico al anterior, pero acotado esta vez, tal y como adelanta el título de la sección, al campo del cuidado de la salud. En este caso, la posibilidad de encontrar una solución adecuada si estaba abierta, aunque, tal y como se ha reflejado en el Capítulo 1, el sistema de hemovigilancia alberga ciertos procesos inherentes muy particulares y, en consecuencia, se intuía que el nivel de adecuación deseado no llegaría a ser correspondido.

La Sección 2.3 recoge el análisis de simuladores de sistemas de hemovigilancia con motivo de la búsqueda de una solución que se adecúe a la totalidad de los requerimientos técnicos y funcionales que ocupan la propuesta. Se recuerda al lector de que el sistema de simulación no solo debe cubrir las funcionalidades que se han enumerado al principio de este capítulo, sino que también debe ser posible integrar en la solución el motor de optimización de planificaciones y la *GUI*. Existen otros requisitos técnicos, pero la imposibilidad de lograr esta integración es óbice suficiente como para aprobar la adopción de cualquier alternativa que no sea un diseño propio personalizado a medida.

Antes de comenzar con el análisis, refrescar brevemente el contexto del que nace y en el que se desarrolla este trabajo contribuirá a la comprensión y justificación del siguiente contenido y las aseveraciones que en este se hospedan. Uno de los principales objetivos de este trabajo (consultar Capítulo 1) es la consecución de una infraestructura virtualizada por *SW* robusta, fiable y escalable, sobre la que poder implementar un modelo de simulación del proceso de hemovigilancia de la *BDSC*. La *BDSC* no es eficiente y el sistema de hemovigilancia definido para su gobierno tampoco. Desde el *CRHM* se ha propuesto una nueva definición del proceso de hemovigilancia con la que optimizar el gobierno de la *BDSC* y la eficiencia de la propia cadena transfusional. Para poder asegurar que esta nueva definición cumple con sus objetivos ha de ser probada, y la forma más adecuada en términos de tiempo, coste y seguridad, es la simulación de este ecosistema. Para corresponder con los requisitos funcionales y técnicos adheridos de la manera más competente se ha llevado acabo el análisis que se desglosa a continuación.

2.1. Simulación de sistemas industriales

Esta sección alberga el análisis, agrupado por funcionalidad, del estado del arte de la optimización de sistemas de simulación industrial de carácter general.

2.1.1. Planificación

Uno de los principales retos a los que se enfrenta el simulador es la planificación óptima de colectas comprendidas en periodos de un mes de duración (consultar Capítulo 1), sin embargo, no se ha realizado ninguna exploración en este sentido, ya que como se ha mencionado en repetidas ocasiones a lo largo de este documento, dentro de la misma línea de investigación en la que se encuentra este trabajo, se ha desarrollado un motor de optimización para la planificación específica de colectas.

En efecto, si se consulta este trabajo [26], concretamente el estudio analítico sobre la optimización de sistemas de distribución que en él se incluye, se puede comprobar como su autor, Eduardo Fernández García, teniendo en cuenta el mismo concepto (planificación óptima de colectas) obtiene una herramienta cuya implementación en el simulador es suficiente para cubrir esta primera disyuntiva.

Dejando a parte la interpretación de la planificación como una tarea concreta y retomando el sentido más amplio de la palabra se pueden encontrar numerosos ejemplos de investigaciones en la literatura.

Legrand *et al.* [38] proponen una solución para la simulación de sistemas distribuidos que permite la simulación de aplicaciones distribuidas en entornos informáticos distribuidos con el propósito específico de desarrollar y evaluar algoritmos de programación. Permite la simulación de agentes de programación distribuida, lo que se ha vuelto crítico para la investigación de programación actual en plataformas a gran escala.

Zhoe [66] propone un enfoque de red de Petri para el modelado, análisis, simulación, programación y control de sistemas de fabricación de semiconductores. Estos sistemas pueden caracterizarse como sistemas de eventos discretos que exhiben relaciones secuenciales, concurrentes y conflictivas entre los eventos y las operaciones. Con ello realizar análisis cualitativos y cuantitativos

Kundu *et al.* [37] proponen el recocido simulado (algoritmo de búsqueda metaheurística para problemas de optimización global) y el algoritmo genético para resolver este problema de programación de enfermería (NSP) se pueden ver como problemas de satisfacción de restricciones (CSP) donde las restricciones se clasifican como restricciones duras y suaves.

Bai *et al.* [10] proponen una solución híbrida entre el método de clasificación estocástica y un sistema de recocido simulado hiperheurístico para abordar las limitaciones dentro de los marcos de algoritmos genéticos.

Hadwan y Ayob [30] un algoritmo heurístico codicioso y constructivo basado en la idea de generar los patrones de cambio más prioritarios primero, para resolver el

problema de las enfermeras. Este enfoque intenta reducir la complejidad del espacio de búsqueda de soluciones generando todos los patrones de turnos permitidos para la obtención del resultado. Finalmente implementan un algoritmo de recocido simulado para mejorar la calidad de dicho resultado.

2.1.2. Campañas de promoción y publicidad

La organización de una buena campaña de comunicación es otro de los grandes retos, dirigirla de forma precisa y establecer los medios adecuados que mejor se adapten a las circunstancias y necesidades son incógnitas que ocupan un amplio espacio en la literatura de cualquier sector económico. Históricamente, empresas como Nike, Apple o Nespresso han demostrado que una campaña de publicidad bien definida y orientada es sinónimo de éxito.

En efecto, uno de los temas más ampliamente tratados es la selección de los canales de contacto (medios de comunicación). Dentro de la literatura se pueden encontrar estudios datados en 1960, en los que ya se comparan métodos como la programación lineal y no-lineal o el análisis marginal con métodos como el empírico o la simulación. Dada la volubilidad que caracteriza la publicidad, siempre adaptada a los gustos cambiantes del público general, cualquier publicación no contemporánea ha sido clasificada como obsoleta y, por tanto, descartada.

La artículo de Baggio *et al.* [9] presenta una comparación entre los resultados obtenidos tras una campaña de envío de mensajes publicitarios frente a los obtenidos por el efecto *boca a boca*. Para efectuar la comparación modelan ambas alternativas y las simulan en un entorno virtualizado. Para el caso de la campaña de envíos de mensajes utilizan el Modelo Magnético Eden, propuesto por Eden (1961), para describir el crecimiento de colonias bacterianas. La formulación matemática elaborada, a partir de la generalización y adaptación del modelo de Eden a situaciones estocásticas, sirve de base para futuras investigaciones en las que se pruebe específicamente el rendimiento de campañas de este tipo (actualmente no es el caso y queda fuera del alcance de este proyecto). Por su parte, el efecto *boca a boca* se estudia bajo un modelo de difusión epidemiológica. Sin entrar en detalles, el estudio concluye que es esta segunda opción la más efectiva, lo que a términos prácticos, será necesario tener en cuenta a la hora de planificar el posible alcance de la campaña de publicidad deseada.

En su publicación de 2013 [41], Negahban propone un marco de simulación de dos niveles para el problema de gestión de inventario (disyuntiva de la oportunidad de venta). Se desarrolla una simulación basada en agentes para modelar el efecto de la intensidad publicitaria y el *boca a boca* sobre la demanda para estimar la distribución de la demanda bajo varios niveles de intensidad publicitaria. Los resultados del modelo basado en agentes se conectan a un modelo de simulación de Monte Carlo para tomar la decisión final sobre la intensidad de publicidad óptima y la cantidad de orden económica con el objetivo de maximizar el beneficio esperado.

Dada la importancia que tiene para el CRHM la gestión de inventario parece ser una propuesta interesante, sin embargo, el caso que ocupa este trabajo no tiene

esa dimensión económica (potencial rendimiento desperdiciado), esta solución trata de comprobar el efecto de la publicidad sobre la demanda, mientras que en el caso de la hemodonación la demanda viene dada (es la que es) y con la publicidad solo se busca corresponder con esa demanda. Es decir, en el modelo de Negahba la publicidad es la causa y la demanda es la consecuencia, en la hemovigilancia la demanda es la causa y la publicidad va en consecuencia a esta. Por último, este planteamiento no tiene en cuenta el almacenamiento de productos perecederos como lo son los hemoderivados. La cantidad de modificaciones que habría que hacer al modelo (prácticamente redefinir el sentido del mismo) para poder adoptar esta solución y el esfuerzo asociado a ello no están justificados por el potencial rendimiento extraíble del mismo.

Aunque no sea el objetivo actual, un sistema capaz de calcular el impacto de las campañas de publicidad de colectas es altamente beneficioso. en especial si se quiere en un futuro incluir las campañas en el ámbito de las redes sociales. Du *et al.* [23] desarrollan un modelo para predecir la asistencia a cierta actividad (la que sea), mediante un algoritmo de descomposición de valor singular con vecindad de factores múltiples (SVD-MFN), explotando así los comportamientos individuales en EBSN, mas allá de los SNS

Sapp *et al.* [53] proponen su *Digital Advertising System Simulation (DASS)* como solución de modelado de la publicidad y su impacto en el comportamiento del público objetivo. Por desgracia, y tal y como es definida dicha solución, se trata de una propuesta genérica que aunque oferta funcionalidades interesantes, como la optimización de la campaña publicitaria, esta se centra exclusivamente en el *marketing* digital, dejando sin soporte los medios de comunicación tradicionales aún necesarios en la actualidad en la promoción de campañas de colectas de hemodonación.

En un artículo publicado este mismo año, Sherstennikov *et al.* [56] presentan un modelo matemático universal para una campaña publicitaria aplicada a empresas que trabajan con un único producto. El objetivo es el calculo del presupuesto óptimo para la campaña en base a una predicción de la demanda. En el caso del simulador que ocupa, actualmente, no es un aspecto prioritario pero puede llegar a desencadenar una interesante línea de investigación.

Un área de estudio susceptible de ser integrada, por su potencial rendimiento y versatilidad, es la postulada por las herramientas CRM como base para el contacto de los objetivos en campañas de publicidad. La integración de dichas herramientas (aquellas de código abierto) en un sistema propio no siempre es directa o simplemente posible. Por otro lado, el CRHM dispone actualmente de su propio sistema de gestión de pacientes/donantes, si bien no cuentan con las capacidades que albergan estas herramientas CRM (en ocasiones imposibles de explotar) para gestionar la información de sujetos (dependiendo del caso: clientes, subscriptores, usuarios, ...) tampoco se ha solicitado un *upgrade* en este tema, y mucho menos pertenece a la labor de este trabajo ejecutarlo.

Gestión de la cadena de suministros

Otra de las grandes incógnitas a resolver es la caracterización de la demanda y la predicción de la misma, así como los requisitos de almacenamiento inherente para el aprovisionamiento de la misma.

Una publicación muy interesante sobre el control de inventario y que, además, está diseñada para artículos de pronta caducidad, es la que ofrece Berruto *et al.* [14], ya que esta solución tiene en cuenta la incertidumbre, la estacionalidad y los picos que caracterizan la demanda. También se estudian los patrones *FIFO* y *LIFO*, que si bien no tienen cabida durante el proceso *Storage*, si la tienen durante el proceso de *Utilization*, con el efecto que esto tiene sobre el proceso de la cadena inmediatamente anterior, *Distribution*. En ocasiones, para algunas transfusiones los hospitales prefieren hacer uso de la sangre llegada recientemente, antes que hacer uso de la que ya se encontraba en el propio hospital. Berruto propone una experimentación basada en la integración del Modelo de Tiempo Discreto con métodos de búsqueda directa, como *SIMPLEX* y la búsqueda de patrones. Los fundamentos teóricos que se explotan en esta solución no van a ser implementados en su totalidad en este trabajo, no por no ser útiles o prácticos, sino porque el desarrollo de esta parte del sistema (*Storage*, *Distribution* y *Utilization*) queda fuera del alcance del trabajo, sin embargo, se auguran como bases fundamentales en el futuro del simulador.

Jung *et al.* [33] propone el uso de modelos determinísticos de planificación y programación que incorporan niveles de existencias de seguridad para el cumplimiento de la demanda rutinaria. Implementa la técnica de la línea de tiempo de Monte-Carlo, usada para la estimación del impacto de los riesgos derivados de la incertidumbre. Esta solución se ha particularizado para la industria de productos químicos, pero es un comienzo interesante para establecer de forma óptima los niveles mínimos de hemoderivados que satisfagan las demandas asídvas de los hospitales y, en caso de ser necesario, emergencias sanitarias puntuales.

En su artículo de 2004, Cheng *et al.* [18] propone la integración de la simulación de eventos discreto y el control estocástico óptimo de inventario y transporte. Se postula como un buen punto de partida, ya que guarda un mismo objetivo de optimización de doble finalidad, finalidades que también se encuentran en el simulador relacionado a este trabajo. El diseño y control óptimo sobre el comportamiento del sistema dinámico y estocástico se ha modelado como un proceso de decisión de Markov. Así mismo, deducen que dada la magnitud de los requisitos computacionales es necesaria la programación dinámica para determinar las políticas de control óptimas. Cheng *et al.* concluyen en un sistema de toma de decisiones automatizado. En el estado de digitalización que se encuentra el CRHM sería un paso demasiado súbito, prefieren mantener esta responsabilidad bajo la decisión de un trabajador experimentado.

En 2007, De Jong *et al.* [21] proponen un modelo para la obtención del tamaño de envío óptimo o el uso de centros de distribución. La escala de este modelo es mundial, quizás intervienen variables que en un sistema como el de la

Región de Murcia, en la que los desplazamientos son diarios (se inician y acaban en el mismo día, y duran un par de horas), no tienen razón de ser. Además, en la mayoría de los casos el tamaño del envío que solicitan los hospitales no requiere un dimensionamiento como tal, y en los casos en los que sí, los medios con los que se cuentan, habilitados para el transporte de hemoderivados, son limitados. Para una empresa dedicada al transporte de mercancía no perecedera en la que estas variables tienen un rango de valores tan amplio esta solución es muy interesante, sin embargo,

En el artículo de Barceló *et al.* [12] se ataca el problema de la congestión del tráfico en entornos urbanos, así como los costes y demás efectos sobre el diseño de la logística. Esta publicación incluye el término holístico para el enfoque del diseño dentro del marco de optimización que define el trabajo. El diseño comprende una base de datos y la gestión de la misma, una base de modelos para albergar los propios modelos y algoritmos matemáticos según la funcionalidad (ubicación discreta o de red, enrutamiento y programación de vehículos) y la gestión de estos modelos (actualizar, modificar, agregar o eliminar modelos), por último, una interfaz gráfica de usuario basada en SIG (definición y actualización de datos, y selección de modelo según el problema a tratar). Se pueden apreciar la cantidad de similitudes entre la solución de Barceló *et al.* y la descrita en este trabajo, similitudes lo suficientemente interesantes como para mantener como referencia dicho artículo como fuente de información útil, sin embargo, son las diferencias las que finalmente llevan a descartar esta propuesta como solución definitiva. En el sistema que ocupa, todos los problemas de optimización son atacados secuencialmente y no al unísono. En definitiva, no se elige una funcionalidad u otra según el problema a resolver, se entiende el problema como un todo que tiene asociado a él diferentes subtarefas que deben ser todas acometidas, siendo estas tareas independientes del momento o circunstancias en las que se ejecuta la simulación.

Otras soluciones como las que presentan Iannoni y Morrabito [31], Friedrich [27] y Van der Vorst *et al.* [60, 61], albergan soluciones parciales, tratando sobre aspectos como la calidad del producto frente al paso del tiempo, la sostenibilidad del diseño logístico y efecto ambiental, *etc.* En el caso de la solución propuesta de Friedrich sí que se encuentran un mayor abanico de consideraciones, pero de nuevo supone un caso más adaptado a una empresa cuya actividad exclusiva es el transporte de mercancías. La propuesta más interesante de entre las citadas anteriormente es la Iannoni y Morrabito, pero la razón que hace a esta propuesta tan interesante es la misma que la convierte en una alternativa directa no válida. Este trabajo ataca el problema del transporte de materias primas desde el lugar de cosecha hasta las plantas de procesamiento (extrapolable al caso del transporte de la unidades de sangre desde los puntos de extracción hasta los centros de fraccionamiento). Dentro de este trabajo, es un aspecto muy importante, sin embargo es una solución parcial y, por tanto, descartada para su implementación. Una política de interacción de soluciones parciales supondría un esfuerzo injustificado, ya que se puede invertir el mismo esfuerzo en desarrollar una solución propia particularizada a cada necesidad parcial, obteniendo así una solución lo más adecuada posible (sin desviaciones innecesarias).

2.2. Simulación de sistemas del cuidado de la salud

De acuerdo a investigaciones realizadas por la empresa *Deloitte*¹ y que ratifica², se espera que los gastos mundiales en atención médica aumenten de forma constante a una tasa anual del 5,4 % hasta 2022, llegando eventualmente a la cifra de 10 billones de dólares.

Ese crecimiento en el mercado mundial de atención médica se traduce en un crecimiento para el mercado de simulación de atención médica y, en consecuencia, la oferta de soluciones en el mismo. La revista *Healthcare Tech Outlook* recoge en su página web³ una lista (actualizada anualmente) de las empresas más destacadas en cuanto a soluciones de simulación se refiere. Ambas firmas rebelan que el grueso de las soluciones están destinadas a facultar de medios simulados y físicos para el ámbito académico⁴, como pueden ser muñecos robotizados humanoides (con los que simular una reanimación cardiovascular o una ecografía) o plataformas de virtualización de quirófanos y otras salas de operaciones con el fin de simular una intervención.

Sin embargo, es necesario tener en cuenta este tipo de soluciones, como la que presentan Phrampus [48] y Cooper [19]. En un futuro puede ser interesante integrar un modelo que permita simular la extracción de sangre. Es verdad que el método no es demasiado complejo y ha sido meticulosamente desarrollado y practicado, pero también es posible el descubrimiento de otro sistema innovador que tenga que ser puesto a prueba y una vez aprobado, este deba ser practicado. Actualmente, este caso no ocupa un lugar en la lista de objetivos prioritarios del proceso de hemovigilancia.

Una foto global (resumen) de la distribución de la literatura referente a la simulación en el campo del cuidado de la salud, es la que nos brindan Wlash *et al.* [64], donde aseguran que solo el 17 % de las publicaciones totales trata sobre la simulación de ambientes totalmente modelados.

La solución patentada de Roesch *et al.* [50] recoge un sistema de planificación para un centro de atención médica, que explota la base de datos propia del centro y la información que esta cobija a través de la aplicación de herramientas de modelado (protocolos de atención, configuración de servicios, análisis financiero, modelado de instalaciones).

Amarasingham *et al.* [7] han patentado un sistema holístico de gestión de atención y gestión de pacientes. Comprende el almacenamiento de información clínica y no clínica de los pacientes, uso de sensores y etiquetas RDIF para el seguimiento de la ubicación de los pacientes en tiempo real, un modelo de predicción para la identificación de la condición médica de los pacientes (en base a variables de riesgo) y una interfaz de usuario para la monitorización del estado del paciente.

¹Deloitte: 2020 Global Health Care Outlook. <https://www2.deloitte.com/global/en/pages/life-sciences-and-healthcare/articles/global-health-care-sector-outlook.html> Última visita: 13/06/2020

²Market Research Engine: Healthcare IT. <https://www.marketresearchengine.com/reportdetails/healthcare-medical-simulation-market> Última visita: 14/06/2020

³Healthcare Tech Outlook: 2020 Top Companies. <https://simulation.healthcaretechoutlook.com/vendors/top-healthcare-simulation-solution-companies.html> Última visita: 13/06/2020

⁴Healthy Simulation: About healthcare simulation. <https://www.healthysimulation.com/healthcare-simulation/https://www.healthysimulation.com/> Última visita: 14/06/2020

Soto *et al.* [58] disponen un conjunto de métodos y sistemas para la implementación de modelos de predicción en el campo del cuidado de la salud. La solución se basa en el uso de especificaciones de modelos de regresión para ser analizados y resolver variables y funciones comunes a todos ellos. Así mismo, el propio Soto junto con Spencus [59] son los que desarrollan patentan un conjunto de métodos a través de los cuales generar dichos modelos de predicción.

Oddoye *et al.* [42] proponen un sistema combinado de técnicas de simulación y programación por objetivos para la planificación de la atención médica en una unidad de evaluación médica (atención de los pacientes en el momento del ingreso). El objetivo es eliminar los cuellos de botella acelerando el diagnóstico preliminar de los pacientes al mismo tiempo que se evitan ingresos innecesarios. Es un desarrollo muy interesante para aplicarse sobre las llegadas de los voluntarios al punto de extracción y sobre los chequeos que posteriormente se ejecutan. La validez de esta propuesta ha sido, por desgracia, probada a partir de información generada arbitrariamente de la observación del trabajo del equipo médico humano y de la simulación de pacientes. Ambas acciones no se requieren en el CRHM por lo que esta propuesta no resulta muy adecuada para su adopción directa.

Por otro lado, Virtue *et al.* [62] han puesto en evidencia y al descubierto la otra cara de muchas de estas adopciones de los modelos de simulación de atención médica. Ya que consideran que han sido deficientes, tratan de reflejar si ha habido una falla generalizada de los modeladores académicos de simulación de atención médica para construir modelos que reflejen problemas reales de atención médica, tal y como así lo reconocen las partes interesadas en la atención médica. El documento propone la clave en la adopción de modelos de simulación de atención médica para lograr mejoras en la eficiencia operativa. Así es el caso que ocupa este trabajo ya que su diseño parte de un motor de optimización de planificación.

Jacobson *et al.* [32] defienden la simulación por eventos discretos como solución para la toma de decisiones sobre la asignación de recursos escasos y como los avances y la proliferación de paquetes *SW* de simulación, cada vez más sofisticados, dan lugar a nuevas oportunidades de aplicación.

Hasta este punto se ha presentado literatura que recoge, en su mayoría, la base teórica fundamental (técnicas, metodologías, formulación matemática, *etc*) que potencialmente rinda el cimiento suficiente para la concepción de la infraestructura del simulador y el propio simulador. A continuación se presenta una comparación resumida de diversas soluciones comerciales ya desarrolladas y que se encuentran disponibles.

Todas las soluciones presentadas en el Cuadro 2.1 se vislumbran muy versátiles y potentes, sin embargo, todo este tipo de soluciones son de pago y de código cerrado, lo que resulta en la imposibilidad de integrar, tal y como se requiere, el motor de optimización y la *GUI* de los que ya se dispone. El portal web G2⁵ es un buscador y comparador de soluciones *SW* para la adquisición de herramientas empresariales. Para el caso que ocupa este trabajo se han analizado numerosas soluciones para

⁵G2: Optimize software cost. <https://www.g2.com/> Última visita: 13/06/2020

Cuadro 2.1: Comparativa entre simuladores comerciales para el cuidado de la salud

Características	SIMUL8	FLEXSIM	ARENA	AnyLogic	SIMIO	ExtendSim	CADLOG	SIMCAD
Modelado 3D	X	✓	✓	✓	✓	X	X	✓
Modelado basado en agente	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Modelado continuo	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Análisis de diseño	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Modelado discreto de eventos	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Modelado gráfico	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Simulación Monte Carlo	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Modelado estocástico	✓	✓	X	✓	X	✓	✓	✓
Base de datos específica por industria	X	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓
Herramientas de presentación	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

la provisión de servicios médicos ⁶, motores de integración de atención médica ⁷, gestión de riesgos sanitarios ⁸, gestión de la cadena de suministros ⁹ y la gestión de RRHH ¹⁰, con el fin de encontrar posibles aplicaciones, sin embargo, se tratan de soluciones de pago, no son de código abierto y tampoco implementan el concepto de optimización por simulación, lo que ha resultado en la ausencia de resultados positivos.

2.3. Simulación de sistemas de BDSC

Aquí se recoge el análisis ejecutado al más bajo nivel posible. En este estadio se han buscado soluciones bajo la perspectiva más aguda, a través de un filtro con todas las variables condicionantes que aplican en la concepción de la infraestructura de simulación objetivo.

Con este fin, se ha analizado la propuesta de Alfonso *et al.* [5], en la que utilizaron modelos formales de Petri para describir los flujos de donantes, después, convierten los modelos de Red de Petri en modelos de simulación de eventos discretos (en otra publicación con la misma firma datada en 2012 [4], los modelos de Petri son enriquecidos con modelos cuantitativos), posibilitando la evaluación de una gran cantidad de escenarios y configuraciones. Proponen modelos cuantitativos que abarcaban todos los componentes de los sistemas de extracción de sangre, como el proceso de llegada de donantes, la capacidad de los recursos y los indicadores de rendimiento. Concluyendo que el nivel de servicio del donante dependía, en proporción idéntica, tanto de los recursos humanos asignados como de la estrategia de convocatoria de los donantes, así como de la distribución de las llegadas de los donantes a lo largo del día. Esta solución se centraba únicamente en puntos de extracción fijos. Son estos mismos autores [3], los que hacen uso de un

⁶G2: Optimize software cost.
<https://www.g2.com/categories/healthcare-service?query=healthcare> Última visita: 13/06/2020

⁷G2: Healthcare Integration Engines. <https://www.g2.com/categories/healthcare-integration-engines?query=healthcare> Última visita: 13/06/2020

⁸G2: Healthcare Risk Management.
<https://www.g2.com/categories/healthcare-risk-management?query=healthcare> Última visita: 13/06/2020

⁹G2: Healthcare Supply Chain.
<https://www.g2.com/categories/healthcare-supply-chain?query=healthcare> Última visita: 13/06/2020

¹⁰G2: Healthcare HR. <https://www.g2.com/categories/healthcare-hr?query=healthcare> Última visita: 13/06/2020

enfoque de optimización de simulación basado en la representación de programación matemática de la dinámica de eventos para la planificación de la capacidad y la programación de citas en los sistemas de extracción de sangre. El modelo matemático está formulado como una programación de enteros mixtos de criterios múltiples (MIP) que corresponde al problema aproximado de la contraparte estocástica que caracteriza la dinámica de eventos subyacentes y las medidas de rendimiento transitorias de un sistema de extracción de sangre que se ha simplificado a un sistema M / M / S (t) (Teorema de colas).

Simonetti *et al.* [57] han desarrollado modelo de simulación de inventario y flujo del suministro de sangre de EE. UU. Para obtener estimaciones de la disponibilidad diaria de sangre. El modelo simuló el impacto potencial en el suministro del uso de diferentes prácticas de manejo de sangre para transfusiones: *FIFO*, usando primero las unidades de glóbulos rojos almacenadas más antiguas; y *LIFO*, preferentemente seleccionando sangre más joven.

Baesler *et al.* [8] también estudian el almacenamiento de componentes sanguíneos, una preocupación importante en la cadena de suministro de sangre. Debido a que estos son productos perecederos, la definición de buenas políticas de inventario es crucial para reducir el desabastecimiento. Para ello crearon un modelo de simulación de eventos discretos utilizando un software de simulación Arena (analizado en este mismo trabajo en secciones anteriores). El modelo replica los procesos que se realizan a lo largo de la cadena de suministro, incluidas las llegadas de donaciones, las pruebas, la producción, la gestión de inventario y el propio envío de las unidades de sangre. Se analizaron doce escenarios diferentes, cada uno de los cuales representaba diferentes políticas de inventario compuestas de una combinación de un inventario óptimo, un punto de pedido y un nivel de donaciones adicionales. El mejor escenario demuestra que es posible disminuir la demanda insatisfecha y el desperdicio de unidades de glóbulos rojos en un 2.5 y 3 %, respectivamente, en comparación con las prácticas actuales. Este trabajo demuestra la utilidad de los estudios basados en la simulación.

Rytilä y Spens [51] proponen la simulación para hacer que los sistemas complejos y caóticos sean comprensibles y más eficientes, usando la experimentación con simuladores como vía de creación de conocimiento. La limitación de esta propuesta radica en la ausencia de un formalismo matemático que avale la extrapolación de los resultados a una situación y entorno propios de la vida real.

Osorio *et al.* [46] presenta un modelo integrado de optimización de simulación basada en eventos discretos para respaldar decisiones estratégicas y operativas en la planificación de la producción, así como un modelo de optimización lineal de enteros que se ejecuta en un horizonte de planificación continuo se utiliza para respaldar las decisiones diarias, como el número requerido de donantes, los métodos de recolección y la planificación de la producción. Para este trabajo Osorio *et al.* cuentan con datos reales de un centro de hemodonación de Colombia (en este trabajo también se trabaja con datos reales del CRHM). Los resultados muestran que, utilizando el modelo propuesto, se mejoran los indicadores clave como la escasez, las unidades obsoletas, los donantes requeridos y el costo.

Katsaliaki y Brailsford [34] hacen uso de la simulación de eventos discretos para determinar las políticas de pedidos que conducen a reducciones en la escasez y el desperdicio, mayores niveles de servicio, mejores procedimientos de seguridad y menores costos, al emplear una mejor coordinación del sistema.

Todas las soluciones aquí presentadas tienen el mismo denominador común, no presentan una propuesta de optimización holística de la BDSC al completo, sino que, o bien atacan un objetivo de optimización en particular, o resuelven la problemática de la planificación de colectas o resuelven la problemática asociada con el nivel de inventario, en cualquier caso, la ausencia de una solución que de cabida a todas las problemáticas, junto con todos los objetivos de optimización, diseñada a través de un enfoque holístico, justifica la razón de ser de este trabajo.

2.4. Fundamentos teóricos

Lo que se busca con la ejecución de este proyecto es la infraestructura de simulación de un sistema de hemovigilancia cuyos preceptos han sido redefinidos (ver Figura 1.2). En base a los análisis efectuados en las anteriores secciones la conceptualización del simulador ha sido articulada y concebida basándose en DEVS, un formalismo de modelado jerárquico matemático regulado por eventos discretos.

El formalismo de modelado y simulación DEVS permite simular modelos bajo una teoría unificada de modelado y simulación en tiempo real, soft-real y virtual, lo que hace que DEVS sea una buena opción para una validación formal antes de la implementación real de un dispositivo físico.

Es necesario entender que, por definición, el propio formalismo garantiza la veracidad de los resultados obtenidos y permite extrapolarlos a la realidad previamante simulada, con la garantía de que estos serán reproducidos, o mejor dicho, replicados. A efectos prácticos, permite al desarrollador incluir en su diseño elementos que no son propios del simulador. Se trata tanto de elementos *software* como *hardware*. Cuando uno de ellos es implementado el término utilizado para referenciar el mecanismo es: para el caso del *HW*, *HIL* (de las siglas en inglés *Hardware-In-The-Loop*) y *SIL/SITL* (de las siglas en inglés *Software-In-The-Loop*) para el *SW*. Esta implementación brinda la oportunidad de simular elementos para su optimización previa la puesta en marcha en un futuro despliegue real y, a su vez, incorporar paulatinamente elementos definitivos del sistema.

DEVS no es el único formalismo disponible, a día de hoy existen diversas alternativas que, sin embargo, han sido descartadas por no ceñirse a las necesidades del proyecto, tanto o con tanta flexibilidad como lo hace DEVS.

- *Automata Theory* cuenta con soluciones en diversas áreas como la interpretación de texto, inteligencia artificial y la biología (evolución, desarrollo biológico, ...), por el contrario, no se adapta tan bien a un entorno de naturaleza más industrial y secuencial como el que demanda el simulador desarrollado en este proyecto.

- *Finite-state machine* representa una alternativa válida si atendemos al aspecto secuencial del sistema. Su funcionamiento consiste en la transición de estados orquestados efectuados según los valores de entrada recibidos. La gran desventaja de este formalismo es que computacionalmente está muy limitado, pudiendo amenazar la potencial escalabilidad del sistema a diseñar. Tampoco responde a una estructura de diseño jerárquica.
- *Petri Net* es óptimo para el modelado gráfico y el análisis de operaciones concurrentes en sistemas distribuidos, muy común en aquellos destinados a la fabricación (área que no ocupa).
- *Markov Chain* es conocido porque describe secuencias de posibles eventos según la probabilidad derivada de los estados a los que están asociados dichos eventos. Este formalismo, cuando tiene lugar durante el transcurrir del continuo tiempo, se denomina *Markov Process*. La lista de áreas en las que es aplicado es basta, ya que es uno de los formalismos más adoptados. Permite hacer predicciones basadas en el estado actual y únicamente este, siendo esta predicción tan precisa como si se contase con el historial completo del proceso. En el caso que aplica, el historial al completo es conocido y no es necesario prescindir del mismo, por otro lado, el sistema no gira entorno a la búsqueda de predicciones.
- *SysML* es un lenguaje de modelado gráfico de propósito general para el análisis, especificación, diseño, verificación y validación de sistemas. El lenguaje tiene como objetivo ayudar a la especificación y arquitectura de los sistemas, así como a la definición de sus elementos, que luego pueden diseñarse utilizando cualquier otro lenguaje específico de dominio, por ejemplo, Lenguaje de Modelado Unificado (*UML*) para el diseño de software. *SysML* está destinado a facilitar la aplicación de un enfoque de interconexión de numerosos equipos (no es el caso).
- *Simulink* es un entorno de programación visual de más alto nivel de abstracción que el lenguaje interpretado *Matlab*, entorno de programación sobre el que trabaja *Simulink*. Este grado de abstracción permite la abstracción de los fenómenos físicos involucrados en la simulación de modelos y sistemas. Está muy extendido en el área de la ingeniería electrónica para el procesamiento digital de señales. El sistema de hemovigilancia no cuenta con este tipo de requerimientos y dado que se disponen de otros formalismos más amistosos, finalmente no se hará uso de *Simulink*.

En último lugar, y no por ello menos relevante, se debe tomar consciencia de que para la concepción del diseño, el desarrollo y ejecución de este proyecto se ha contado con el acceso al asesoramiento de José Luis Risco (tutor), quien ha trabajado en el desarrollo de DEVS junto con su propio creador, el visionario Bernard P. Zeigler. Una razón de peso a la hora de elegir sobre qué formalismo inclinarse, ya que bajo su deferencia era posible obtener el máximo potencial que ofrece DEVS.

En todo proyecto, sin el debido trabajo analítico previo no es posible confeccionar una planificación que se adecúe a los requerimientos técnicos asociados

a la ejecución de dicho proyecto tal y como se ha podido rescatar de la literatura analizada. Naturalmente, en el caso que ocupa, junto con la elección del formalismo, el siguiente aspecto más relevante asociado a la conceptualización de un sistema de simulación, es la elección del propio *SW* de simulación. Para facilitar la comprensión del porqué el desenlace a la disyuntiva presente ha adquirido el cáliz que se refleja a continuación, es necesario rescatar el conjunto de circunstancias que perfilan y describen el ecosistema que enfrenta el diseño objetivo.

El problema de la inmensa mayoría de los simuladores es que no se ajustan, en la medida de lo deseable, al aspecto operacional de un sistema de salud, por lo general sí responden al carácter industrial pero no tanto al contexto que ocupa. Que respondan a estos propósitos generales del cuidado de la salud encontramos diversas alternativas como SIMUL8¹¹, CADLOG¹², Arena¹³, FlexSim¹⁴, Simio¹⁵, Extendsim¹⁶, Anylogic¹⁷ o Simcad Pro Health¹⁸. En los casos listados anteriormente en los que si se satisface esta condición, se tratan de soluciones de pago, cuyo código fuente es inaccesible y, por tanto, inútil para el desarrollo del sistema de simulación de este proyecto. Simio, a pesar de ser gratuito, no es una propuesta tan interesante puesto que el simulador que se quiere desarrollar no requiere la simulación de datos de entrada, entre otras cosas, el objetivo principal ha sido desde un inicio la provisión de una infraestructura de simulación funcional, que actúe de intermediario entre un optimizador, del que ya se dispone, y una *GUI*, la cual se esta desarrollando en paralelo a este proyecto y dentro de la misma línea de investigación para la proyección en entorno gráfico del simulador.

Se ha optado por hacer uso de xDEVs - publicado como *Open Source* bajo *Lesser General Public License* (LGPL 3.0) en GitHub¹⁹ debido a la naturaleza de los diferentes modelos predictivos que podemos usar, además de por su semántica, rendimiento e implementación, de notoria sencillez, dado que xDEVs esta codificado en JAVA y Python. A pesar de que el este entorno de simulación no incorpora aún una *GUI* nativa, se está trabajando en la implementación de una interfaz tal y como se describe en [49].

DEVs es un formalismo de modelado modular y jerárquico, con todas las ventajas y usos de los sistemas de simulación, tales como: integridad, verificabilidad, extensibilidad y mantenibilidad, y permite la ejecución de simulaciones Monte Carlo, simulación paralela usando hilos o distribuida usando webs [63], por ejemplo. En este proyecto se ha hecho uso de la biblioteca JAVA de código abierto xDEVs con el

¹¹SIMUL8 2020: Use cases for simulation. <https://www.simul8.com/use-cases>

¹²CADLOG 2020: Prototipado virtual. <https://www.cadlog.es/prototipado-virtual>

¹³Arena 2020: Healthcare simulation software. <https://www.arenasimulation.com/industry-solutions/industry/healthcare-simulation-software>

¹⁴FlexSim Healthcare 2020: Healthcare simulation software. <https://healthcare.flexsim.com/healthcare-simulation-software>

¹⁵Simio 2020: Simulation software (Personal edition). <https://www.simio.com/free-simulation-software>

¹⁶Extendsim 2020: Extendsim in healthcare. <https://extendsim.com/solutions/industries/healthcare>

¹⁷Anylogic 2020: Healthcare simulation software. <https://www.anylogic.com/healthcare>

¹⁸CREATEaSOFT 2020: Healthcare simulation software. <https://www.createasoft.com/healthcare-simulation>

¹⁹xDEVs 2020: JAVA library for DEVs. <https://github.com/jlrisco/xdevs-lib>

objetivo de comprobar la eficacia práctica simulada de las conjeturas y suposiciones del nuevo paradigma y, tras la consecución exitosa de resultados positivos, realizar una implementación futura en un entorno y ecosistemas reales. DEVS es, además, un formalismo general para el modelado de sistemas de eventos discretos basado en una teoría de conjuntos matemáticos [65]. Durante las últimas cuatro décadas, se ha utilizado para implementar un sistema descrito formalmente utilizando una biblioteca de software/hardware existente en varios lenguajes (por ejemplo, Lisp, Scheme, C ++, JAVA, Python, *etc*).

DEVS dispone dos tipos de modelos diferenciados: atómicos y acoplados. Un modelo atómico es irreducible y especifica el comportamiento de cualquier entidad modelada: procesa un evento de entrada en función de su estado y condición, y genera un evento de salida y cambia su estado. DEVS representa formalmente un modelo atómico en tres conjuntos: entrada (X), salida (Y) y estado (S), y cinco funciones: avance de tiempo (ta), transición externa (δ_{ext}), transición interna (δ_{int}), confluente (δ_{con}) y salida (λ). Formalmente, se expresa de la siguiente manera:

$$A = \langle I, O, X, S, Y, \lambda, \delta_{int}, \delta_{ext}, \delta_{con}, ta \rangle \quad (2.1)$$

donde:

- I es el conjunto de puertos de entrada.
- O es el conjunto de puertos de salida.
- X es el conjunto de entradas descritas en términos de pares puerto-valor: $\{p, v\}$.
- S es el espacio de estados. Incluye el actual estado del modelo atómico y dos parámetros especiales denominados σ y $fase$. Mientras que σ representa el tiempo que transcurre hasta la generación de un nuevo evento, la $fase$ constituye la descripción del actual estado (típicamente bajo lenguaje natural).
- Y es el conjunto de salidas, descritas también en términos de pares puerto-valor: $\{p, v\}$.
- $\lambda : S \rightarrow Y$ es la función salida. Cuando el tiempo transcurrido desde la última función de salida es igual a σ , entonces, λ es ejecutada automáticamente.
- $\delta_{int} : S \rightarrow S$ es la función de transición interna. Se usa para cambiar de estado S , la $fase$ y σ , y es ejecutada justo después de la función de salida (λ).
- $\delta_{ext} : Q \cdot X^b \rightarrow S$ es la función de transición externa. Se ejecuta de forma automática por acción de un evento externo que llegue por un puerto de entrada, de ser necesario, el estado cambia.
 - $Q = (s, e), s \in S, 0 \leq e \leq ta(s)$ es el conjunto de estados totales, donde e es el tiempo transcurrido desde la última transición.
 - X^b conjunto de elementos de X .

- $\delta_{con} : Q \cdot X^b \rightarrow S$ es la función confluyente, sujeta a $\delta_{con}(s, \emptyset) = \delta_{int}(s)$. Esta transición es seleccionada si δ_{ext} y δ_{int} deben ser ejecutadas al mismo tiempo.
- $ta(s) : S \rightarrow \mathbb{R}_0^+ \cup \infty$ es la función que describe el transcurso del tiempo.

Un modelo acoplado agrega o interconecta dos o más modelos atómicos o acoplados. Se describe formalmente como:

$$M = \langle I, O, X, Y, C_i, EIC, EOC, IC \rangle \quad (2.2)$$

donde:

- I, O son los conjuntos externos (no acoplados) de los puertos de entrada y salida.
- X es el conjunto de eventos externos de entrada.
- Y es el conjunto de eventos de salida.
- C_i es un conjunto de modelos de componentes DEVS (atómicos o acoplados). Nótese que C_i hace esta definición recursiva.
- EIC es la relación de acoplado externa de entrada.
- EOC es la relación de acoplado externa de salida.
- IC es la relación de acoplado interna.

Dada la definición en Ec. 2.2, un modelo acoplado puede ser, en si mismo, un componente en un modelo acoplado más grande, dando lugar a una construcción jerárquica del modelo DEVS.

CAPÍTULO 3

Metodología

3.1. Marco general

En este capítulo se desglosa la metodología empleada para la obtención de los resultados que se presentan en este proyecto (ver Capítulo 5). Se trata de una herramienta capaz de proveer el soporte necesario para la simulación del comportamiento de la cadena transfusional bajo los preceptos embebidos en el nuevo paradigma (ver Capítulo 2).

La propuesta que se describe a lo largo de este capítulo trata de seccionar los diferentes aspectos que intervienen en el proceso de la transfusión, delimitar su influencia, particularizar cada subproceso y aproximar cada uno, de forma aislada, con el fin de evitar obviar cualquier singularidad inherente que pueda afectar en cierta medida al resultado final de la simulación. Este razonamiento responde a la necesidad de optimizar de forma aislada todos aquellos aspectos del sistema de transfusión para que, a continuación, estas optimizaciones trabajen al unísono en el sistema de forma conjunta y así lograr lo que se conoce como optimización holística. La arquitectura de elementos de sistema puede consultarse en la Figura 3.1.

Debe tenerse presente, en todo momento, los nuevos preceptos del paradigma (ver Figura 1.2), pues es sobre ellos donde se cimienta el diseño del sistema. La escuela tradicional defiende un sistema de hemovigilancia estructurado entorno a los siguientes cuatro procesos (ver Figura 1.1): **Planificación, Donación, Transporte y Fraccionamiento y Transfusión**. Una definición parca originada en la necesidad de describir los principales procesos implicados suficientes. El Centro Regional de Hemodonación de Murcia (CRHM) entiende dicha aproximación insuficiente para poder abordar todos los aspectos que intervienen en el proceso (no solo los suficientes, también los influyentes). En las circunstancias dadas actuales se está experimentando un efecto de ineficiencia evidente, el cual, no puede ser analizado y atacado eficazmente en los términos de granularidad y visión obtusa con los que se viene trabajando hasta la fecha. En respuesta al problema, se han definido un conjunto más extenso de procesos ya que: se entiende que su implicación y repercusión en el conjunto es suficiente; o porque se ha comprobado que encierran

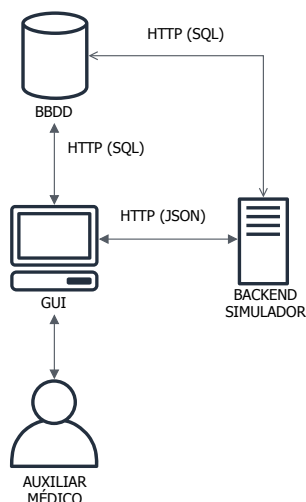


Figura 3.1: Esquema de los actores que conforman el entorno del simulador

ineficiencias o inexactitudes que, tratadas con el debido cuidado, dedicación y detalle, podrían marcar una diferencia a mejor.

De esta reflexión nacen las definiciones de los procesos: Promoción (**Advertising**), Ofrecimiento (**Offering** nace de **Donación**), Colección (**Collection** nace de **Donación**), Control de calidad (**QA & QC**), Distribución (**Distribution**) y Utilización (**Utilization** nace de **Fraccionamiento y transfusión**). Los otros procesos ya existentes (**Planificación-Scheduling**, **Transporte-Transportation**, **Fraccionamiento-Fractionation**), por motivos obvios, han experimentado un proceso de actualización con el que ser adaptados al nuevo paradigma.

Agudizar los análisis y estructurar el sistema de hemovigilancia con mayor granularidad, y por ende, mayor detalle, trae consigo importantes consecuencias. Ahora se tienen en cuenta numerosas variables que antes no, la complejidad del sistema para su funcionamiento en conjunto incrementa notoriamente, así como lo hacen las casuísticas y las particularidades. A efectos prácticos, nos encontramos que a medida que comienza el desarrollo de los primeros modelos que albergan cada proceso de la cadena transfusional bajo el nuevo paradigma, se hace necesario definir procesos auxiliares y modelos adicionales no previstos. Tras un primer desarrollo ha surgido la necesidad de definir y desarrollar un nuevo modelo de este tipo, el **Despachador-Dispatcher**.

En el caso concreto del **Dispatcher** se trata de un modelo necesario desde el punto de vista técnico, es decir, es necesario para el correcto funcionamiento del simulador, pero no tiene ninguna resonancia en el proceso de hemovigilancia en sí (requisito no funcional del simulador). Podría parecer un hecho colateral, pero despierta la duda sobre si en un futuro será necesario definir modelos nuevos, no contemplados, que si pertenezcan al proceso de hemovigilancia. En definitiva, el nivel de esfuerzo y recursos requerido es sustancialmente mayor, e incrementa a medida que el sistema adquiere madurez.

Dada la magnitud del ecosistema a simular, y al tratarse todavía de un nuevo

paradigma, ciertos subprocesos de la cadena no han sido sometidos a los pertinentes estudios y análisis que permiten interpretar, en términos técnicos, las mecánicas de la vida real, es decir, se desconocen con exactitud las dinámicas y procesos que intervienen en el normal discurso de la acción en la vida real y, por tanto, se desconocen los requisitos técnicos, funcionales y no funcionales (bases de datos, generación de documentos de formato físico, ...), y no es posible emularlos dentro del ecosistema del simulador.

Quedan, por tanto, fuera del alcance de este proyecto el modelado, desarrollo y simulación de los procesos: Transporte (**Transportation**), Ofrecimiento (**Offering**), Colección (**Collection**), Fraccionamiento (**Fractionation**), Control de calidad (**QA & QC**), Almacenamiento (**Storage**), Distribución (**Distribution**) y Utilización (**Utilization**); para centrarse en la consecución de un herramienta que albergue, tanto aquellos modelos que, en términos de virtualización, ya pueden ser materializados: Planificación (**Scheduling**), Despachador (**Dispatcher**), Promoción (**Advertiser**) y Servidor (**EFHTTPServerSender**); como el potencial para acomodar futuros modelos que incluso el estado de la técnica podría no haber contemplado en la actualidad. Una descripción más detallada del segundo conjunto de modelos puede ser consultada más adelante (ver la Sección 3.3).

3.2. Modelo conceptual

En respuesta a las premisas descritas en la introducción de este capítulo y con la disposición base del formalismo DEVS (consultar Capítulo 2), se ha diseñado un modelo de sistema que contempla, cubre y soporta de forma íntegra y en conjunto (enfoque holístico), las dependencias de cada proceso implicado en interacción continua (secuencias de comunicación entre procesos). Cada uno de los procesos redefinidos en el nuevo paradigma está representado por un modelo dentro del sistema, tal que observando la Figura 3.2 se tienen las siguientes relaciones, sencillas de elaborar dado que para nombrar cada modelo, se ha recurrido como fuente de referencia al nombre de cada proceso de la Figura 1.2 al que representa.

- (i) *Scheduling*: Modelo de planificación (**Scheduler**)
- (ii) *Advertising*: Modelo de promoción (**Advertiser**)
- (iv) *Offering*: Modelo de ofrecimiento (**Offering**)
- (v) *Collection*: Modelo **Collection**
- (iii),(vi) *Transportation*: Modelo de transporte (**Transportation**)
- (vii) *Fractionation*: Modelo de fraccionamiento (**Fractionation**)
- (viii) *QA & QC*: Modelo de control de la calidad (**QA & QC**)
- (ix) *Storage*: Modelo de almacenamiento (**Storage**)
- (x) *Distribution*: Modelo de distribución (**Distribution**)

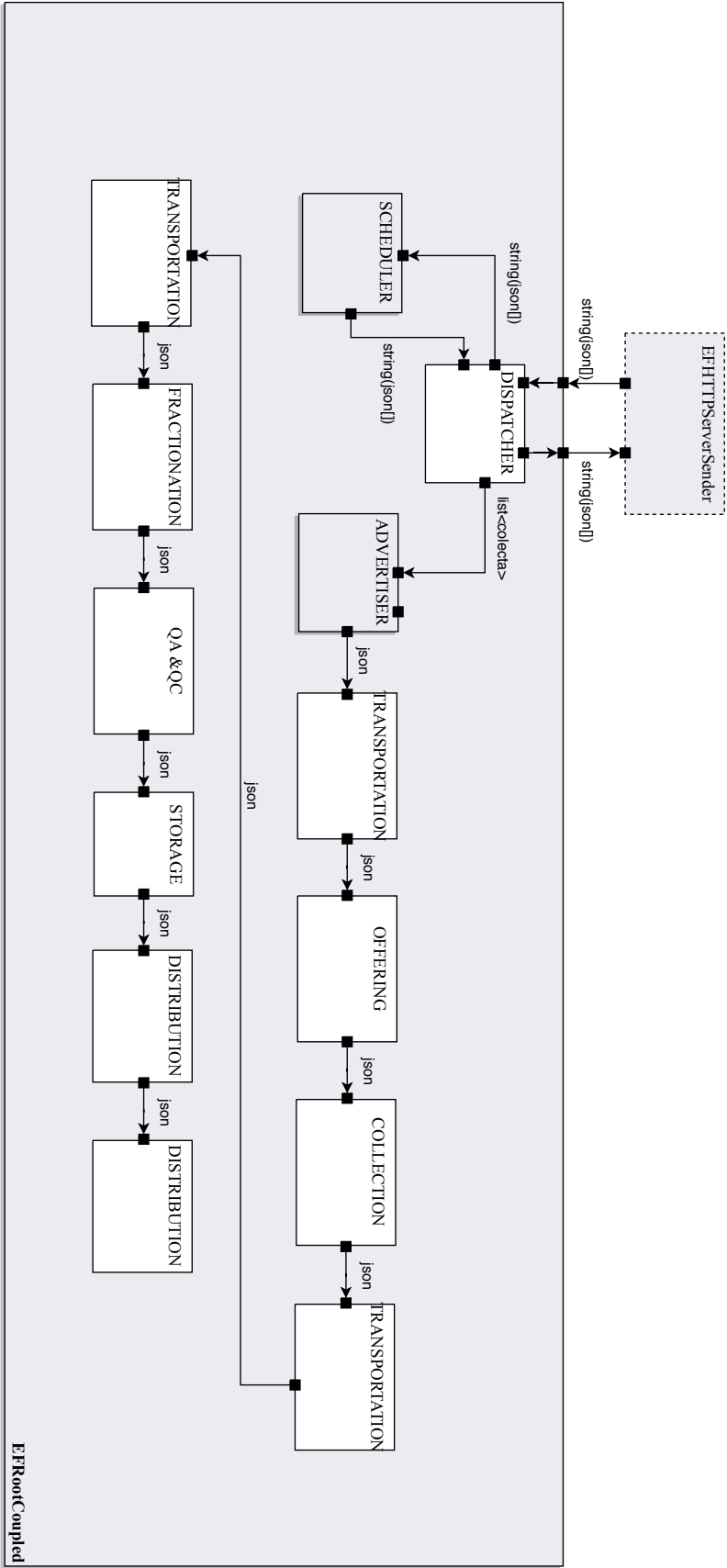


Figura 3.2: El modelo RootCoupled es el marco de simulación y alberga todos los modelos acoplados y atómicos del sistema.

- (xi) *Utilization*: Modelo de utilización (*Utilization*)

Las tres anomalías que se infieren del listado anterior las ocupan el modelo despachador *Dispatcher*, el modelo servidor *EFHTTPServerSender* y el proceso de hemovigilancia *Utilización (Utilization)*. Mientras que los dos primeros no son procesos propios de la hemovigilancia, se han desarrollado como consecuencia de nuevas necesidades relativas al funcionamiento del simulador, esto significa, que estos modelos son solo necesarios para que el sistema simulador pueda funcionar de forma consecuente; el tercero es un proceso que, aún perteneciendo al ejercicio de la hemovigilancia, no forma parte del simulador ya que, primero, aunque este aporta información adicional al modelo de distribución, no es una información influyente y, segundo, las transfusiones como tal están fuera del control del simulador en sí mismo.

La Figura 3.2 representa el sistema desde un punto de vista global y absoluto. Las principales especificaciones y descripciones detalladas correspondientes a cada modelo son facilitadas en secciones posteriores. Los bloques de la Figura 3.2 sombreados en gris representan modelos acoplados. Bajo un fondo blanco se representan los modelos atómicos. Los bloques de contorno punteado no son parte del sistema, sin embargo, en un entorno virtual simulado son estrictamente necesarios y son incluidos como tal. En una implementación real serían eliminados de la simulación y sustituidos por elementos *HW* o *SW* (co-simulación).

En un entorno de producción en el que el simulador ha sido desplegado, diversos agentes externos al simulador interactúan con este y es entonces cuando es posible extraer el rendimiento esperado del simulador, motivación original por el que se concibe el simulador. En un entorno virtual previo al despliegue, es necesario que estos agentes externos que van a interactuar con el simulador sean, a su vez, simulados. Solo de esta forma se pueden replicar las condiciones de un entorno real y, de este modo, poder aceptar los resultados de la simulación como válidos y extrapolables a dicho mundo real. En el caso concreto de este proyecto, estos modelos permiten probar las nuevas definiciones de los procesos, así como su efectividad y la razón de ser de las mismas, manteniendo siempre y en todo momento una perspectiva holística en cuanto a la optimización se refiere.

Tal es el caso del modelo servidor *EFHTTPServerSender*, el cual se muestra en la Figura 3.2 como el único de los modelos de este tipo. Este modelo alberga la única entrada externa que, hasta la fecha, dispone el sistema propiamente dicho, al mismo tiempo, posee como única entrada, la única salida definida, hasta la fecha, sobre el sistema. Desde este momento, se hará referencia al sistema bajo el término *RootCoupled*, cuando se haga referencia al marco de simulación que interconecta los modelos *SIL/SITL* (modelo servidor *EFHTTPServerSender*) con el propio sistema de optimización de la hemovigilancia, al que a su vez se hará referencia bajo el término *Efsys*. El *Efsys* descrito al detalle en secciones posteriores representa la inteligencia del sistema, es decir, el conjunto de capacidades de las que dispone el simulador para emular la hemovigilancia y optimizar la misma de forma holística. A través de esta entrada y salida el modelo *RootCoupled* es capaz de transmitir la planificación de colectas a la *GUI* cliente para su presentación apropiada al operador humano, y es capaz de recibir las instrucciones de este operador. De esta forma, se establece el

puente para la intercomunicación interactiva simulador-humano-simulador.

En secciones anteriores se ha mencionado que, en paralelo a la ejecución de este proyecto, se está desarrollando una *GUI* a través de la cual presentar el simulador a un operador humano y que, al mismo tiempo, haga las veces de buzón de entrada de datos, en sentido contrario que en la anterior interacción, es decir, el operador hará uso de la *GUI* para introducir datos en el simulador. Exactamente, la interfaz será el medio a través del cual se muestre la planificación elaborada por el motor optimizador del simulador (alojado en el modelo de planificación) y, simultáneamente, servirá al propósito de recoger los ajustes pertinentes que el operador hace sobre la planificación. Es para poder simular este procedimiento que se ha concebido el modelo servidor **EFHTTPServerSender** (ver Figura 3.4).

Si se retoma la Figura 3.2 es posible apreciar, con cierta facilidad, que se trata de un sistema secuencial, en efecto, a grandes rasgos lo es. Sin embargo, se tiene dos comportamientos distintos. Este sistema está dividido en dos por el modelo de promoción **Advertiser**, obteniendo así dos conjuntos. El primero de ellos lo constituyen el modelo de planificación **Scheduler**, el modelo despachador **Dispatcher** y el modelo servidor **EFHTTPServerSender**, el segundo de los conjuntos, está integrado por el modelo de ofrecimiento **Offering**, el modelo de colección **Collection**, el modelo de transporte **Transporter**, el modelo de fraccionamiento **Fractionation**, el modelo de control de la calidad **QA & QC**, el modelo de almacenamiento **Storage** y el modelo de distribución **Distributor**. Haciendo frontera se encuentra el modelo de promoción **Advertiser**. Esta estructura debe su origen a que una vez la acción llega al modelo de ofrecimiento **Offering**, secuencialmente desemboca en cadena a través de todo el segundo conjunto en el modelo de distribución **Distribution** sin posibilidad alguna de retorno, o dicho en otros términos, los modelos del segundo conjunto solo son ejecutados una única vez y, de nuevo, de forma secuencial. El primero de los conjuntos también trabaja de forma secuencial, de forma análoga al segundo conjunto, pero en esta ocasión la secuencia a través de un proceso recursivo se repite tantas veces como se requiera y sea pertinente. En efecto, estos modelos se ejecutan más de una vez.

En resumidas cuentas, el modelo de planificación **Scheduler** genera una propuesta inicial sobre una planificación de colectas mensual. Esta información se envía al modelo despachador **Dispatcher** donde es procesada para su registro en una Data Base (**DDBB**) y ser reenviada al modelo servidor **EFHTTPServerSender**. Este modelo presenta la información al operador humano y recoge todas las arreglos y ediciones que este haya considerado pertinente hacer. Se envía la información de nuevo para que el modelo despachador **Dispatcher** actualice los registros de la **DDBB** y reenvíe la información al modelo de planificación **Scheduler** el cual se sirve de la información recibida para definir las restricciones de optimización para generar una nueva propuesta de planificación de colectas. El proceso se repite tantas veces como el operador considere oportuno. Los detalles específicos referentes al tipo de datos que se transmiten entre los diferentes modelos pueden ser consultados en la Sección 3.2.1. Se debe tener en cuenta que dentro del proceso de hemovigilancia en su conjunto (ver Figura 1.2), el objetivo principal por el que se analiza la BDSC al completo y se desarrolla un simulador de optimización holística, es que se puedan

ir depurando las inexactitudes arraigadas en el mismo, tales como la obtención de demasiado producto hemoderivado por la demanda de plasma o la ausencia de alguno de estos hemoderivados, la llegada de donantes de forma masiva en ciertos momentos y la ausencia de estas en otros. En definitiva, se trata de satisfacer las necesidades (inventario de hemoderivados) de forma óptima.

Haciendo uso de la mayor cantidad de información posible, procedente de todo los procesos que constituyen la cadena de transfusión, se estiman las colectas (localidades, fechas, horarios, recursos, rutas, material médico y logístico, ...). En el momento en el que un donante llega al punto de extracción, como resultado del ejercicio intensivo de planificación óptima, se considera que tanto la planificación como la campaña publicitaria han sido un éxito. En cierto sentido, el éxito (número de donantes, cantidad de hemoderivados extraídos, nivel de ocupación de los almacenes, *etc*) depende de esa planificación, de la propuesta del optimizador y los arreglos del operador humano y, en segundo lugar, de la campaña de publicidad. No se atribuye tanta importancia a los errores que se puedan cometer a partir del modelo de ofrecimiento **Offering** ya que estos errores son menores, desde el punto de vista de la planificación y predicción óptimas.

Por este motivo, para la primera versión del sistema el desarrollo del simulador se ha limitado a este primer conjunto de modelos (modelo de planificación **Scheduler**, modelo de promoción **Advertiser**, modelo despachador **Dispatcher** y el modelo servidor **EFHTTPServerSender**), ya que son los principales responsables de generar el compromiso a satisfacer (número de donantes, cantidad de hemoderivados extraídos, nivel de ocupación de los almacenes, *etc*). Es a lo largo de estas iteraciones recursivas (citadas en párrafos anteriores), entre el modelo de planificación **Scheduler**, el modelo de promoción **Advertiser**, el modelo despachador **Dispatcher** y el modelo servidor **EFHTTPServerSender**, donde se erigen las pautas a través de las cuales alcanzar los objetivos de optimización establecidos, cumpliendo así el compromiso de responsabilidad adquirido. Para ello, se ha priorizado la integración del **Scheduler** (planificador de colectas optimizado), el modelo servidor **EFHTTPServerSender** (comunicación con la *GUI*) y el modelo de promoción **Advertiser**.

Volviendo a la Figura 3.2, se tiene lo que se entiende como una primera fase o estadio, en la que, a partir de una demanda y del nivel de inventario en los almacenes se establece de forma conjunta entre el **Scheduler** (motor de optimización) y el modelo servidor **EFHTTPServerSender** (*GUI*) una planificación de colectas lo más adecuada posible a las condiciones dadas. Después, el modelo de promoción **Advertiser** genera el contenido propagandístico consecuente para la convocatoria de voluntarios cuyas donaciones satisfagan las necesidades derivadas de la demanda y nivel de inventario citados en un comienzo. La segunda fase constituye la operativa que a efectos prácticos transforma las donaciones en transfusiones.

Por ejemplo (ver Figura 3.3), partiendo de dos ejecuciones completas del simulador independientes y separadas en el tiempo, pero contiguas la una de la otra. Partiendo de cierta demanda (cualquiera) y del resultado obtenido de la primera ejecución, se obtiene el porqué de la necesidad de una segunda ejecución, así como el objetivo o meta de la misma, el qué. Entonces, en la segunda ejecución la primera

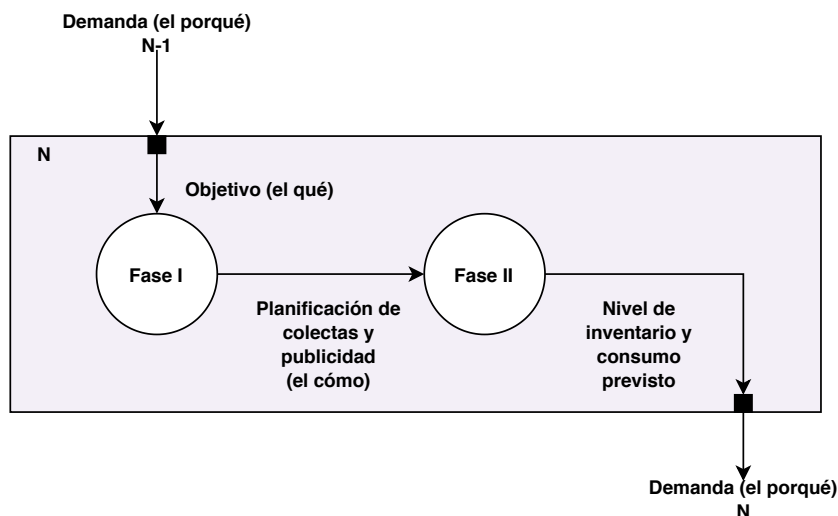


Figura 3.3: Diagrama del ejemplo de la división del proceso total del EFRootcoupled en fases

fase del simulador partiendo del qué, establecerá la planificación de la colecta y la convocatoria pertinente, el cómo. Una vez se obtienen las pautas para alcanzar el objetivo o meta finales (el cómo y el qué respectivamente), en la segunda fase del simulador se ejecuta la operativa subyacente que transforma el plan en resultados tangibles. El resultado de esta segunda ejecución junto con el establecimiento de una nueva demanda (cualquiera) constituyen el porqué de una potencial tercera ejecución completa del ciclo de simulación.

Para facilitar la explicación y situar de manera más sencilla el alcance del desarrollo de la versión actual, las descripciones y explicaciones sobre el EFRootCoupled se van a agrupar por bloques denominados fases. Las fases son separaciones temporales lógicas. Lo que acontece antes de la colecta y lo que acontece durante y después de la colecta.

En la primera fase se tiene una planificación de colectas óptima considerablemente lograda, sin embargo, cuando se habla de la publicidad no puede hacerse en términos de planificación, el punto de madurez del desarrollo no lo permite, ya que el modelo de promoción (**Advertiser**) no se encarga de elaborar una planificación de la campaña de publicidad entorno a la planificación de colectas, sino que se vale de esta última para generar contenido publicitario. Actualmente, no se elige entre el uso de medios tradicionales o digitales y los canales específicos en base a parámetros, como tal, el proceso no resulta en un plan de comunicación óptimo. Para lograrlo deberían impulsarse investigaciones que estudien y analicen cómo a partir de información demográfica y el tipo de localidad poder estimar la dimensión del alcance de la campaña y los medios aptos óptimos de forma dinámica. Actualmente, se genera un PDF y un mensaje que se envía por internet a una plataforma de mensajería instantánea a la que el público puede asociarse para mantenerse informado si así lo desea.

La integración de una base de datos que permita llevar un seguimiento

contable del público objetivo, permitirá al modelo de promoción **Advertiser** planificar el avituallamiento que se ofrece a los donantes tras la extracción, abriría la posibilidad de implementar otros canales de contacto alternativos en el ámbito digital, que aunque no acaben de aportar dinamismo y se les aplique el mismo uso que la plataforma de mensajería instantánea, aportarían pluralidad de medios. Por otro lado, la planificación de colectas no está exenta de mejoras. Actualmente hay ciertas variables que no han sido incluidas dada la complejidad de la que dotarían al motor de optimización. La implementación de un optimizado de rutas requiere de un estudio conciso sobre como implementar una herramienta que permita cargar y modelar el entorno urbano (mapa) y sus dinámicas (emulación del tráfico). Quedaría estudiar si el desarrollo de una solución propia es viable o si, por el contrario, es más sustancial la implementación de una solución de algún tercero. Si esta optimización de rutas se efectúa teniendo en cuenta diferentes unidades móviles disponibles con sus diferentes capacidades de almacenamiento, la tarea se complica aún más si cabe.

La segunda de las fases comienza, objetivamente, con el modelo de transporte *Transportation*. A efectos prácticos el conjunto de acciones que permiten desplazar el equipo profesional médico (humano y técnico) al punto de extracción móvil. Desde un punto de vista lógico no se trata como un proceso de la fase dos por dos simples motivos: en caso de que el punto de extracción sea fijo y este disponible de forma permanente este proceso no tiene cabida y tampoco aporta a la transformación de las extracciones en transfusiones efectiva. Por tanto, desde un punto de vista lógico la segunda fase del proceso que se encarga de llevar la sangre desde el donante al receptor comienza con el el modelo de ofrecimiento **Offering**.

A priori, el modelo de ofrecimiento **Offering** se muestra como un proceso que queda fuera del control de todo sistema ya que las legadas de los donantes se pueden interpretar como un fenómeno natural del libre albedrío. Sin embargo, en el Capítulo 2 se han mostrado diferentes estudios que han estudiado este fenómeno desde un enfoque de optimización. En efecto, es necesario esforzarse en capacitar a este modelo de los mecanismos pertinentes que permitan modelar las llegadas a la vez que se implementan otras herramientas que permitan elevar el nivel de servicio de los donantes (evitando desestimaciones y reduciendo los FN). Estos progresos en las capacidades, ahora inexistentes, de optimización no solo aportarán la consecución del mayor número de posibles donantes para ser examinados médicamente durante el proceso de colección (**Collection**), un mejor nivel de servicio contribuye a incrementar la buena opinión sobre el servicio médico.

El proceso de colección **Collection** se ejecuta una vez se han comprobado los datos personales del donante y ha pasado satisfactoriamente un examen de preguntas personales. En este punto se realiza un chequeo médico. Los resultados obtenidos en este punto sobre el donante (perfil médico), serán los que se utilicen para identificar, en primera instancia la sangre, después los hemoderivados y finalmente la transfusión. Este proceso ya ha sido nombrado anteriormente y es vital para obtener un sistema de transfusiones seguro y libre de incidencias médicas. Dada la importancia de esta trazabilidad de la sangre, o *vein-to-vein*, es aconsejable que desde el modelo de ofrecimiento **Offering** hasta el modelo de utilización **Utilization**, los procesos estén capacitados para funcionar en torno a esta trazabilidad.

Una vez se extrae y se embolsa la sangre esta se etiqueta con la información pertinente del donante y se fecha con un sello de tiempo, que sirva de referencia para su almacenamiento. en el caso en el que la extracción se hubiese realizado en un punto de extracción móvil la sangre debe ser transportada a un centro de hemodonación (si la extracción se ha realizado ya en un centro de hemodonación este paso no es necesario).

En este punto tiene lugar el proceso de fraccionamiento (**Fractionation**) a través del cual se obtienen los subproductos de la sangre. Los hemoderivados resultantes también son etiquetados con la información de procedencia heredada de la bolsa de sangre inicial y con un nuevo sello de tiempo. La sangre y sus derivados son productos perecederos y no todos poseen el mismo tiempo de vida. Es muy importante llevar el control en todo momento del producto manipulado. De forma paralela al modelo de fraccionamiento **Fractionation** se desarrolla el proceso de control de calidad **QA & QC** que engloba todas las acciones para asegurar la calidad y seguridad de las bolsas de sangre y sus derivados. Si se detecta cualquier anomalías puede ser que se requiera avisar al donante (caso extremo). Este representa uno de todos lo ejemplo que refuerzan la idea de etiquetar y trazar la sangre durante su viaje a lo largo de los procesos.

Una vez estos procesos se dan por concluidos toma el relevo el el modelo de almacenamieinto **Storage**. Es el proceso a través del cual se almacena el inventario. Un sistema basado en el etiquetado del inventario por RFID permitiría construir un sistema de trazabilidad automatizado que, a su vez, permitiría la recolección de cantidad de datos sobre los que en un futuro poder aplicar técnicas de *Machine Learning* y *Big Data*, resultando en un sistema con mayor capacidad de optimización. Es importante que durante el proceso de almacenamiento **Storage** se mantenga un estado actualizado del nivel de inventario, no solo para hacer frente a la demanda rutinaria, sino porque en ocasiones es posible tener que afrontar situaciones de crisis sanitarias y el sistema debe estar preparado para hacer frente o por lo menos, para poder reaccionar frente a estas circunstancias.

El proceso de distribución **Distribution** sirve para hacer llegar los hemoderivados al lugar donde se va a efectuar la transfusión (en caso de que sea necesario). Las premisas y consideraciones son similares al proceso de transporte **Transportation**.

Finalmente, el proceso de utilización **Utilization** engloba las acciones a través de las cuales se efectúa la transfusión al receptor objetivo. En este punto concluye el *vein-to-vein*. Se percibe la importancia de ejecutar la trazabilidad sobre la sangre y los hemoderivados y la articulación de esta segunda fase del simulador entorno a esta idea.

El alcance propio de cada uno de los modelos se desglosa en secciones venideras (ver Sección 3.3).

3.2.1. Modelo de comunicación

Dentro de este espacio se va describir al detalle todo lo referente a las interacciones entre los modelos que comportan el sistema de simulación. Tal y como se ha hecho anteriormente en este documento y se seguirá haciendo en adelante, el contenido se estructurará entorno a los modelos que han sido completamente desarrollados y son plenamente funcionales (modelo de planificación **Scheduler**, modelo de promoción **Advertiser**, modelo despachador **Dispatcher** y el modelo servidor **EFHTTPServerSender**), y el restante conjunto de modelos que no lo han sido y únicamente han sido definidos bajo el prisma de un nivel de abstracción alto (modelo de ofrecimiento **Offering**, modelo de colección **Collection**, modelo de transporte **Transporter**, modelo de fraccionamiento **Fractionation**, modelo de control de calidad **QA & QC**, modelo de almacenamiento **Storage** y modelo de distribución **Distributor**).

Fase I de la ejecución

El modelo de planificación **Scheduler** tiene la responsabilidad de generar una planificación mensual de colectas, esta propuesta esta constituida por una colecta por cada unidad móvil disponible y día del mes. Para ello parte de un conjunto real de datos facilitados por el CRHM (en la versión actual desde una hoja de calculo, en futuras versiones desde una base de datos). Las colectas albergan información referente a la planificación, referente a la logística, referente al aspecto médico embebido y la necesaria para su edición en la *GUI* (podrían entenderse como los comandos que dispone el sistema para su gobierno). Una perspectiva resumida de la implementación de la colecta en el sistema se puede consultar en el Cuadro 3.1.

El objeto colecta alberga a su vez otros dos objetos: *Turn* (ver el Cuadro 3.2) donde almacena tanto la hora de comienzo como la de finalización del turno, según si la colecta se celebra por la mañana o por la tarde; y *Forecast* (ver el Cuadro 3.3), que almacena información estadística de la predicción, la fecha y el turno de la colecta y el y el tipo de punto de extracción (empresa, centro educativo, campaña deportiva, cuerpos y fuerzas de seguridad del estado ...).

Estas colectas antes de ser enviadas por el modelo de planificación **Scheduler** al modelo despachador **Dispatcher** son reformateadas, ya que estas se almacenan en un documento de extensión *CSV*. Como ya se ha dicho, existe una colecta por cada unidad móvil de desplazamiento disponible y día del mes (aproximadamente), una gran cantidad e información. Para agilizar la transmisión de esta información dos de los formatos más adecuados eran *XML* y *Json*. Dado que no se va a implementar ninguna plantilla contra la que verificar los datos y el aspecto visual es del todo irrelevante, se ha elegido el uso de objetos de tipo de *Json* (ver Lista 1). De este modo, el objeto que se envía, realmente, desde el modelo de planificación **Scheduler** al modelo despachador **Dispatcher** es una cadena de caracteres (*String*). Un objeto de tipo *Json* está constituido por un conjunto indefinido de elementos, cada elemento es un par "atributo : valor". *Json* es flexible lo que permite definir cualquier conjunto de valores, en cualquier momento, sin la necesidad de establecer una clase o estructura

Cuadro 3.1: Información relativa a la cada colecta que maneja el simulador

Nombre	Tipo de atributo	Breve descripción
Loc_id	INT	Id del centro de hemodonación
Name	String	Nombre del centro de hemodonación
City	String	Nombre de la ciudad
Business	Boolean	Día laboral
Turn	Turn	Objeto para almacenar el horario
Vehicle	String	Tipo de unidad móvil
Forecast	Forecast	Objeto para almacenar predicción
Forecast_Donnors	INT	Número de donantes previstos
Drivers	INT	Número de conductores
Admin	INT	Número de profesionales administrativos
Nurses	INT	Número de enfermeras
Doctors	INT	Numero de doctores
Blocked	Boolean	Confirmación de bloqueo
Blocked_modified	Boolean	Confirmación de bloqueo con modificación
Validated	Boolean	Confirmación de validación
Validated_modified	Boolean	Confirmación de validación con modificación

Cuadro 3.2: Información relativa al turno de la colecta

Nombre	Tipo de atributo	Breve descripción
StartTurn	String	Hora de inicio del turno
EndTurn	String	Hora de finalización del turno

de datos específica para cada ejemplo.

Como ya se ha comentado en reiteradas ocasiones a lo largo del texto, se ha desarrollado una *GUI* dentro de la misma línea de investigación. Se recuerda al lector que la *GUI* es la parte visible de un servicio y que, por tanto, es el medio por el que se presenta la información de las colectas. *Json* es texto, y podemos convertir cualquier objeto *JavaScript* en *Json* y enviar *Json* al un servidor. También podemos convertir cualquier *Json* recibido del servidor en objetos *JavaScript*.

En el lado del cliente web es muy beneficioso poder contar con elementos *JavaScript* y así facilitar la provisión de cierto dinamismo en el cliente, necesario para poder, al mismo tiempo que se muestran las colectas, recoger las configuraciones y ediciones del operador humano.

Dado que se tienen un número indefinido de colectas y, por tanto, de objetos *Json*, se construye un *array* de objetos *Json* (ver Lista 1) que finalmente se transforma en el *String* que se envía.

El modelo despachador **Dispatcher** es el encargado de procesar los intercambios entre la *GUI* y el simulador para registrar esta interacción en una base de datos. La lógica sobre la información y el procedimiento que implica esta

Listing 1 Formato *array Json y String* resultante

```
1  [
2      {
3          "loc_id": "10001"
4          "name" : "HOSPITAL DE LA VEGA",
5          "city" : "MURCIA"
6          "turn":""
7          "forecast"{
8              "date":"2020130"
9          }
10         "forecastDonnors": 500
11         "drivers": 4
12         "admin": 2
13     },
14     {
15         "loc_id": "13018"
16         "name" : "ZARANDONA",
17         "city" : "MURCIA"
18         "turn":""
19         "forecast"{
20             "date":"2020130"
21         }
22         "forecastDonnors": 500
23         "drivers": 4
24         "admin": 2
25     },
26     .
27     .
28     .
29
30 ]
```

```
1  "[{"loc_id\\": \\\"10001\\\"\\\"name\\\" : \\\"HOSPITAL DE LA VEGA\\\",...
2  \\\"city\\\" : \\\"MURCIA\\\"\\\"turn\\\":\\\"\\\" \\\"forecast\\\"{\\\"date\\\":...
3  \\\"2020130\\\"}\\\"forecastDonnors\\\": 500\\\"drivers\\\": 4\\\"admin\\\":...
```

Cuadro 3.3: Información relativa a la predicción de la colecta

Nombre	Tipo de atributo	Breve descripción
Name	String	Nombre del centro de hemodonación
Calendar	Calendar	Calendario del equipo <i>host</i>
Date	Date	Fecha de la colecta
Business	Boolean	Día laboral
Shift	String	Turno de la colecta
Type	String	Tipo de punto de extracción
Forecast_TBU_mean	INT	Media de la predicción
Forecast_TBU_std	INT	Desviación de la media de predicción

base de datos se describe más adelante. Dado que en la *GUI* solo se necesita trabajar con datos específicos, son solo estos los que se envían. La información de colecta se puede consultar en el Cuadro 3.4. Esta versión de las colectas adaptadas también se transforma en objetos *Json* y en un *String* y se envían a la *GUI*.

Hasta este momento se ha hecho referencia al término *GUI* para facilitar la comprensión del concepto, sin embargo, desde este punto se hará referencia al modelo servidor **EFHTTPServerSender** de la Figura 3.2, ya que objetivamente y a efectos prácticos, en términos de simulación la comunicación entre el agente externo (*GUI*) y el sistema de hemovigilancia (**EFsys**) se emula con dicho servidor **EFHTTPServerSender** y el modelo despachador **Dispatcher** respectivamente.

Una vez que la colecta (ver Figura 3.4) se transmite desde el **Dispatcher** al **EFHTTPServerSender** esta se muestra en pantalla para su revisión y edición por parte del operador. Esta edición debe ser interpretada por el lector como el gobierno del propio simulador.

Tal y como se ha descrito en la Capítulo 1 de este documento, la *GUI* es el único punto de acceso externo al sistema de simulación y de interacción con este. Este punto de acceso se simula mediante el modelo servidor **EFHTTPServerSender**.

Cuando el operador del simulador se encuentra con la presentación de las colectas, dispone de cinco opciones: puede validar la colecta, puede bloquearla, puede pedir la validación de una colecta previa modificación, puede solicitar el bloqueo de una colecta previa modificación y, por último, puede pedir comenzar a generar la publicidad sobre la colecta. Estas elecciones se guardan en los campos *validated*, *blocked*, *validated_modified*, *blocked_modified* y *Advertising* en la colecta adaptada para trabajar con la *GUI* (ver Cuadro 3.4). Se puede deducir, entonces, que el simulador ofrece cuatro comandos para editar la planificación. Si el motor de optimización acaba utilizando estas ediciones como restricciones para la obtención de una nueva planificación, se puede traducir que los comandos introducidos para la edición de la planificación se convierten, en última instancia, en los medios de gobierno del propio sistema de simulación (*EFsys*).

Cuadro 3.4: Información de colecta enviada a la *GUI*

Nombre	Tipo de atributo	Breve descripción
Date	Date	Objeto para almacenar la fecha de la colecta
Loc_id	INT	Id del centro de hemodonación
Name	String	Nombre del centro de hemodonación
City	String	Nombre de la ciudad
Business	Boolean	Día laboral
Vehicle	String	Tipo de unidad móvil
Forecast_TBU_mean	INT	Media de la predicción
Forecast_TBU_std	INT	Desviación de la media de predicción
Forecast_Donnors		Número de donantes previstos
Drivers	INT	Número de conductores
Admin	INT	Múmero de profesionales administrativos
Nurses	INT	Número de enfermeras
Doctors	INT	Numero de doctores2
Blocked	Boolean	Confirmación de bloqueo
Blocked_modified	Boolean	Confirmación de bloqueo con modificación
Validated	Boolean	Confirmación de validación
Validated_modified	Boolean	Confirmación de validación con modificación

Una vez el operador del simulador establece las indicaciones o comandos sobre las colectas el servidor **EFHTTPServerSender** genera un objeto *Json* por cada colecta sobre la que se ha modificado, el consecuente *array* de objetos *Json*, y finalmente el *String* que se envía de vuelta al modelo despachador *Dispatcher*. En este caso la cantidad de información sobre la colecta es menor (ver Cuadro 3.5).

Esto se debe a que, principalmente, el contenido sobre la colecta (*name*, *city*, *business*, *forecast*, *drivers*, *admin*, *nurses*, *doctors* del Cuadro 3.4), solo tenía propósitos informativos prácticos para el operador a nivel visual. Sin embargo, al no existir este propósito de presentación de información cuando se envía la respuesta desde el modelo servidor **EFHTTPServerSender** al modelo despachador **Dispatcher**, desde un punto de vista operativa, el modelo despachador *Dispatcher* solo requiere de la información que se muestra en el Cuadro 3.5. Esto es así, por que el modelo de planificación **Scheduler**, cuyo motor de optimización va a elaborar la nueva propuesta de planificación, necesita únicamente esta información para crear las restricciones que constituyan un nuevo marco de optimización para esa nueva propuesta.

Cuadro 3.5: Información de respuesta de la *GUI*

Nombre	Tipo de atributo	Breve descripción
Json_id	String	Id del objeto Json
Comando	String	<i>validated</i> , <i>blocked</i> , <i>validated_modified</i> y <i>blocked_modified</i>
Data	Objeto Json	[Opcional] Se implementa solo cuando hay modificaciones, en ese caso, almacena la información a modificar

No tiene relación con la comunicación entre modelos, pero un inciso en este momento sobre la dinámica entorno a la implementación de la base de datos, ayudará al lector a entender de forma más clara el porqué de las diferencias entre los datos que salen del **Efsys** y los que retornan de vuelta.

Implementación de una base de datos

Tal y como se ha definido, las comunicaciones **Efsys-EFHTTPServerSender-Efsys** emulan las interacciones entre el simulador y la *GUI*. Estas interacciones son necesarias para poder elaborar de forma conjunta entre humano y máquina una planificación óptima. Se requiere por tanto, la presentación de la planificación de colectas en sentido **Efsys-EFHTTPServerSender** y las correcciones o ediciones sobre esta propuesta en sentido **EFHTTPServerSender-Efsys**.

La información que se manipula durante estas comunicaciones es de una importancia crucial, ya que es solo gracias a esta que se puede establecer una planificación óptima de colectas, generar la publicidad y promoción consecuentes para convocar al número de donantes óptimo y las unidades de sangre extraída de estos que, en última instancia satisfaga la demanda.

Tal y como puede apreciarse, todo el proceso depende de esta operación entre el **Efsys** y el **EFHTTPServerSender**. Se requiere por tanto asegurar la integridad de la información que se maneja así como la veracidad de la misma. Para poder asegurar que esta información esté actualizada y a la vez disponible para soportar comunicaciones asíncronas, queda implícito el uso de una base de datos.

La implementación de este recurso no solo permite el almacenamiento y la disponibilidad, también asegura que las acciones que se realizan sobre la propia base de datos son robustas y fiables. Las operaciones de lectura, escritura y actualización son atómicas, una vez cualquiera de estos procedimientos es iniciado no puede ser interrumpido, en caso de problemas ajenos, como interrupción de las comunicaciones, la base de datos restaura la última versión estable de la información almacenada.

Cuadro 3.6: Información almacenada en la base de datos y formato de la misma

Id	Json_id	Blocked_as_it	Blocked_modified	Validated_as_it	Validated_modified	Advertising
Identificador de registro	Identificador de colecta	Variable de confirmación	Variable de confirmación	Variable de confirmación	Variable de confirmación	Variable de confirmación

En el caso de este simulador, la base de datos almacena información sobre las acciones (ver Cuadro 3.6) que el operador haya realizado sobre cada colecta. En realidad, no es tan simple. Como se ha descrito antes, la comunicación en cada sentido sirve al mismo propósito pero implica acciones diferentes principios que precipitan sobre la base de datos irremediamente.

En primera instancia, cuando el **Dispatcher** recibe la planificación de colectas crea un registro por cada una de ellas en la base de datos. Para ello, crea el identificador de colecta (consultar formato 3.1) concatenando el *Id* del centro de

hemodonación donde se celebra la colecta a la fecha en la cual se celebra dicha colecta, resultando:

$$AñoMesDía_LocalizaciónId(3.1)$$

En este momento el resto de campos de cada registro se inicializan con valores nulos. Desde una perspectiva lógica es importante hacerlo de esta manera que si se leen esos campos, se interpretan como que realmente no hay información útil en ellos.

Cuando el modelo despachador **Dispatcher** acaba esta operación envía la información al modelo servidor **EFHTTPServerSender** tal y como se ha descrito anteriormente y queda a la espera de recibir la contestación de vuelta. Cuando llega este momento, el modelo despachador **Dispatcher** actualiza la base de datos. Para ello, son necesarias dos acciones. Como ya se ha dicho, esta respuesta contiene únicamente comandos sobre ciertas colectas, las colectas sobre las que no se han ejercido ningún comando no tienen cabida en este procedimiento. En consecuencia, el modelo despachador **Dispatcher** actualiza los registros de las colectas que sí tienen asociadas comandos, aquellas restantes registros que no tienen actualizaciones son borrados de la base de datos.

Antes de explicar el procedimiento de actualización de los campos de los registros de la base de datos, conviene describir que tipo de datos se almacena, su posibles valores y el significado e implicaciones de esos valores, esta descripción es la siguiente.

- El identificador de colecta *Json.id* es un simple *String* (ver Ec. 3.1).
- Los campos *validated*, *blocked*, *validated_modified*, *blocked_modified* y *Advertising* son de tipo *booleano*. Las variables *booleanas* son binarias, es decir, solo tienen dos posible valores: verdadero (*TRUE*) y falso (*FALSE*). Tal y como se intuye, estos posibles valores confirman o niegan cierta condición sobre una variable, la cual se suele describir con el propio nombre que se asigna a al propia variable.

Una vez se tiene una descripción clara de los tipos de datos de los campos de los registros de la base de datos, es necesario tener una descripción adicional sobre el formato y la información que se envía desde el *EFHTTPServerSender*, y así poder hacer la relación comando, información enviada y acción sobre la base de datos. De forma adicional al formato presentado anteriormente (ver Cuadro 3.5), a continuación se muestra una respuesta *Json* enviada por el modelo servidor *EFHTTPServerSender* y servirá para ilustrar un ejemplo concreto.

La descripción de los procedimientos que se ejecutan según el comando recibido puede ser consultada a continuación.

- El comando *Blocked* bloquea la colecta para que el optimizador en una nueva ronda de optimización no lo modifique. Por tanto, se tendría el campo

Listing 2 Formato *Json* de respuesta

```

1  [
2      {
3          "json_id": "20200130_100003"
4          "blocked" : "true",
5      },
6      {
7          "json_id": "20200130_10001"
8          "validated" : "true",
9      },
10     {
11         "json_id": "20200130_1512B"
12         "blocked_modified" : "true",
13         "data":{
14             "date":"20200130",
15             "shift":"M"
16         }
17     }
18 ]

```

Blocked_as_it a *TRUE* y los restantes a *FALSE*. Esta acción se realiza cuando el operador del sistema da por buena una colecta tal y como está pero todavía no ha sido validada, es decir aun no se ha comprobado que puede ser celebrada en las condiciones estipuladas.

- El comando *Blocked_modified* es una petición forzosa a través de la cual se solicita el bloqueo de la colecta tras realizar las modificaciones que se exigen. La descripción de esas modificaciones. Por tanto, se tendría el campo *Blocked_modified* a *TRUE* y los restantes a *FALSE*.
- El comando *Validated*, al igual que *blocked*, sirve para bloquear la colecta en el optimizador, pero además indica al *Advertiser* del simulador que ya puede comenzar a generar contenido publicitario para la campaña de promoción. Por tanto, se tendrían los campos *Validated_as_it* y *Advertising* a *TRUE* y los restantes a *FALSE*. Esta acción se realiza cuando el operador del sistema da por buena una colecta tal y como está y, además, se ha comprobado que puede ser celebrada en las condiciones estipuladas.
- El comando *Validated_modified* es similar al *Blocked_modified* pero en esta ocasión también se manda la orden al *Advertiser*. Por tanto, se tendrían los campos *Validated_modified* y *Advertising* a *TRUE* y los restantes a *FALSE*.

Queda describir exactamente qué ocurre cuando se solicita una modificación. La información que debe ser modificada y el valor concreto por el que debe hacerse se encuentran dentro del objeto *Json* denominado *Data* (ver la Lista 2 y Cuadro 3.4).

Cada objeto *Data* se compone de pares atributo-valor de toda la información o dato que el operador quiere modificar. En lo que respecta a la base de datos la única información sobre la planificación que se registra puede ser un cambio de fecha o de centro de hemodonación. También pueden ser modificados el resto de datos, pero estas modificaciones no quedan registradas en la tabla que se implementa para el registro de comandos. Ambos datos pertenecen al *Json_id* (ver Cuadro 3.6). Si se recupera el formato de dicho campo (ver Ec. 3.1) resulta sencillo interpretar que parte del **String** es actualizado: si lo que se pide es modificar la fecha, se reescribe *AñoMesDía*; y si lo que se pide es modificar el centro de hemodonación, se reescribe *LocalizaciónId*.

Ahora se sabe, que cuando desde el modelo servidor **EFHTTPServerSender** se recibe un **Json** con el atributo "*Validated*": "*true*", el **Dispatcher** notifica al **Advertiser** que debe generar la publicidad pertinente. Para ello, el **Dispatcher** envía al **Advertiser** toda la información que tiene referente a la colecta (ver Cuadro 3.1).

Como ya se ha expresado en capítulos anteriores, es en este punto, cuando la ejecución del simulador llega al modelo **Advertiser** que el simulador ha acabado con la primera fase de la ejecución y comienza la segunda. Es por esto, que el **Advertiser** se conoce como modelo frontera que separa la ejecución en dos fases. Se recuerda al lector, que esta división se hace desde un punto lógico y con fines didácticos, para reflejar de este modo las dos dinámicas principales del simulador: en la primera se da un ciclo de iteraciones en las que los modelos se ejecutan repetidamente hasta tener la planificación óptima definitiva y en la segunda los modelos se ejecutan una única vez de forma secuencial uno de tras de otro sin posibilidad de retorno, a través de lo que se consigue emular la cadena BDSC desde la extracción de la sangre hasta la transfusión de la misma (*vein-to-vein*).

A continuación, se describen estas comunicaciones que tienen lugar en la fase dos de la ejecución del sistema **RootCoupled** (ver Figura 3.2).

Fase II de la ejecución

Esta fase del simulador no se ha desarrollado aún de forma madura dado que todavía no se poseen las formulaciones y algoritmos matemático-estadísticos a partir de las cuales modelar los procesos. Sin embargo, partiendo de las definiciones del CRHM en colaboración con el grupo de investigación donde se desarrolla este trabajo, incluidas en el Capítulo 1 de este documento, de los análisis reflejados en el Capítulo 2 y de la experiencia adquirida durante el diseño y desarrollo logrados hasta el momento se puede elaborar una idea aproximada del modelo de comunicación de esta segunda fase. Por mantener la coherencia con el resto del proyecto, y con el fin de facilitar la comprensión del simulador, en el texto subyacente se presentan los primeros pasos de lo que seguro será una investigación de largo recorrido.

En el momento que el modelo despachador **Dispatcher** acaba su ejecución envía el objeto *Json* colecta al modelo de transporte **Transportation**. Por motivos de sencillez, se supone el mismo objeto colecta que llega al modelo de promoción

Advertiser (ver Cuadro 3.1) puesto que este alberga toda la información relativa a la coleta, y en estos pasos prematuros es arriesgado entrar en suposiciones sobre qué información es estrictamente necesaria y cuál no. En principio, se establece que cada comunicación nueva heredará la información de la anterior y añadirá información adicional de la que sí se tenga la certeza de su importancia. En los casos claros donde la información ya no sea relevante también se prescindirá de ella.

En lo que al modelo de transporte **Transportation** atañe, se trata de un proceso bastante simple cuya operativa se limita a la ejecución y no tanto a la decisión nacida de la búsqueda de la optimización.

El modelo de ofrecimiento **Offering** modelo inmediatamente posterior al modelo de transporte **Transportation** hereda ese mismo *Json* heredado a su vez previamente por el modelo de transporte **Transportation**. El modelo de ofrecimiento **Offering** debe simular la tasa de llegadas (descrita por la predicción de donantes totales *forecast_donnors* ver Cuadro 3.1), para ello se deberá implementar modelos de llegadas de Markov en la que la tasa de llegadas siga una distribución de Poisson o, lo que es lo mismo, exponencial, también es posible una tasa de tiempos determinista o una distribución general, una gran alternativa es el uso de datos históricos que ya se encuentra a disposición del grupo de trabajo. El servicio dependerá de cuantos profesionales estén disponibles para la recepción de los voluntarios. Todos estos modelos matemático-estadísticos deberán ser extraídos de una base de datos, que permita almacenar las especificaciones y configuraciones de los escenarios posibles y que brinde al *Offering* todo los parámetros y recursos necesarios para ejecutar las simulaciones de dichos escenarios.

Al terminar su ejecución, el modelo *Offering* reenviará el *Json* al siguiente modelo, en este caso el **Collection**. El proceso añade nueva información al objeto **Json** con el que se está trabajando. Esta información será la distribución de tiempo que describa las llegadas de los donantes y la información de los voluntarios que han sido aprobados para el cheque médico. Se estima que datos como la identificación del donante, su grupo sanguíneo o el tipo de donación a realizar por este donante se obtendrán de este proceso. Este modelo también deberá ejercer el mismo mecanismo de simulación de escenario que su modelo predecesor en la cadena (ver Figura 3.2), sin embargo este modelo trabajará con las variables del **Json** *forecast_tbu_mean* y *forecast_tbu_std*, las predicciones del número medio de bolsas que se espera obtener, y la desviación sobre esa media del valor asociado al número de donantes predicho *forecast_donnors*. También se prevé el uso necesario de una base de datos. Este proceso tendrá como resultado el extracto contable de las unidades de bolsa extraídas de los donantes, así como los hemoderivados (plaquetas, plasma y hematíes). Así mismo, se generará información para el etiquetado de las bolsas. Estas etiquetas contarán con información sobre la colecta, concretamente el *Id* que identifica la colecta, la información del donante heredada del *Offering* y un sello de tiempo con la fecha y la hora en la que se produjo la bolsa.

En este punto se entiende que toda la información de la planificación de la coleta ya no es importante y, en consecuencia, ya no se hace uso de ella. Desde este punto la información que se transmite entre modelos puede ser consultada en la Lista 3.

Listing 3 Formato *Json* de la información de las extracciones

```
1      {
2          "donantes": "500"
3          "recolección">{
4              "tbu": "400"
5              "plaquetas": "100"
6              "plasma": "100"
7              "hematíes": "100"
8          }
9      }
10
11  [
12      {
13          "loc_id": "4000A"
14          "donante">{
15              "id": "A3455678"
16              "grupo": "ab+"
17          }
18      },
19      {
20          "loc_id": "4000A"
21          "donante">{
22              "dni": "A3455679"
23              "grupo": "a-"
24          }
25      },
26      {
27          "loc_id": "4000A"
28          "donante">{
29              "dni": "A3455680"
30              "grupo": "ab-"
31          }
32      },
33      .
34      .
35      .
36  ]
```

En la Lista 3 se pueden apreciar dos estructuras de tipo **Json**: la primera es un objeto que guarda la información contable sobre el número de donante y el número de bolsas resultante de la colecta. Esta información es susceptible de ser registrada en una base de datos para servir en análisis forenses posteriores; la segunda estructura es un *array*, también *Json*, que se constituye por la información de etiquetado de bolsas. Desde un punto de vista lógico, cada objeto del *array* representa una bolsa

(sangre total, hematíes, plaqueta o plasma) y contiene la información que se ha descrito anteriormente. Este *array* de objetos deberá ser tratado como el anterior y registrado en un base de datos, ya que en ese punto, se tiene el máximo numero de unidades o bolsas posibles. En adelante, el numero de estas podrá disminuir según se comentan, o no, errores. Ambas estructuras *Json* deberán ser transmitidas al siguiente proceso.

De nuevo entra en ejecución el modelo de transporte **Transportation**. De nuevo, se encuentra un proceso en el que no se toman decisiones, ni se da lugar a una simulación de optimización de gran importancia. Simplemente, se simulará cierto error derivado de la manipulación de las bolsas.

La información transmitida al modelo de transporte **Transportation** es ahora heredada por el modelo de fraccionamiento **Fractionation** el cual emula el procesado de las bolsas de sangre para la obtención de subproductos. El resultado es el mismo que para el modelo de colección *Collection*, en este caso se producen nuevas bolsas que son etiquetadas de nuevo, en esta ocasión se incluye la caducidad del producto que contiene la bolsa. Toda la información nueva generada, deberá ser registrada en una base de datos. A la par que el modelo de fraccionamiento **Fractionation** y después del mismo se ejecuta el modelo de control de calidad **QA & QC** que se encarga de supervisar las condiciones de seguridad y salubridad de las bolsas. Este proceso detectará problemas con los productos y permitirá que estos sean descartados. Excepto los registros contables que se deben almacenar para tener en cuenta errores del proceso, este modelo no aporta mucho más a las comunicaciones del sistema.

El modelo de almacenamiento **Storage** hará uso de la información contable sobre las extracciones para llevar a cabo el control del nivel de inventario, pero de por sí, se trata de otro proceso que salvo la supervisión y el registro del nivel de inventario, así como las operaciones de entrada y salida del mismo, asociadas a las donaciones y transfusiones respectivamente, no alberga una complejidad como tal. A partir de este punto solo se transmitirá información relativa al etiquetado de bolsas. Se prevé que sea implementado como un modelo de productor consumidor(es). 1 bolsa de sangre da lugar a 3 *buffers* (plasma, hemoglobina y leucocitos) que se consumen de forma distinta. Además para rellenar una unidad de plasma, se necesitan 4-5 de sangre total.

El modelo de distribución **Distribution** debe mantener el control sobre las bolsas ya que se debe asegurar la trazabilidad de la sangre desde el donante hasta el receptor. La investigación en este proceso se deberá centrar en encontrar el modelo de requerimiento de sangre de los hospitales que subyace e integrarlo.

Por último, se encuentra el modelo **utilization** al tratarse de una intervención médica habrá que tener las mismas consideraciones que en el modelo **Collection** donde se efectúa la extracción. este modelo heredará la información de etiquetado

3.3. Formalización DEVS del modelo conceptual

A continuación, se describe, de forma detallada, el sistema de simulación de hemovigilancia bajo el formalismo DEVS.

3.3.1. Modelos acoplados

Existen cuatro tipos de modelos acoplados en nuestro sistema son: **EFsys**, **Scheduler**, **EFHTTPServerSender** y **Advertiser**. Dado que **RootCoupled** es el sistema en sí mismo, este supone la Figura 3.2 en su totalidad. El modelo acoplado **RootCoupled** enmarca el simulador y lo alberga al completo, interconecta los modelos que simulan los agentes externos, con el modelo del sistema de hemovigilancia en **EFsys**. El **EFsys** aloja los dos restantes modelos acoplados el **Scheduler** y el **Advertiser** detallados más adelante. Es el **EFsys** el modelo que alberga la inteligencia del simulador (el sistema de hemovigilancia), la parte del sistema que contiene aquello que en una implementación real o virtualizada no puede ser reemplazada por hardware o sustituida por otro tipo de agente externo, por ejemplo, de naturaleza humana. A su vez, realiza el procesamiento a partir de los datos de los modelos atómicos de salida única **EFserver** y **GUI**. Así mismo, el sistema proporciona una salida para el modelo atómico de entrada única **GUI**.

EFHTTPServerSender

El modelo acoplado **EFHTTPServerSender** (ver Figura 3.4) ha sido desarrollado para emular la posible actividad o interacción de un operador humano con el sistema a través de un servidor remoto. A pesar de que la primera versión que se ha logrado al término de este proyecto será ejecutado de forma local, en el mismo equipo en el que se ejecuta el programa cliente y se alberga el **GUI**, este modelo se ha concebido con la idea de que, en el futuro, el simulador pudiera ser alojado en un servidor, mientras que el usuario humano ejecuta su cliente web en un equipo en otra localización cualquiera. Es preciso resaltar que todo el sistema se ha diseñado para evitar que procesado alguno de los datos debiera ejecutarse en el cliente o, dicho de otra forma, evitar que la capa de presentación tuviese que albergar inteligencia alguna más allá de la relativa a la mera presentación de la información. Por ello, el modelo atómico **Dispatcher** ha sido capacitado para formatear las colectas y estructurar los datos y, en última instancia, el modelo **EFHTTPServerSender** es el encargado de hacer llegar la información al cliente mediante un mensaje **POST**. Este diseño permite aislar la capa de presentación del sistema, desvinculándolo del mismo.

Este modelo acoplado alberga cuatro modelos atómicos para la emulación de un servidor y de la **GUI**. Estos modelos atómicos son: **JavaHTTPServer**, **DispatcherSenderAgent**, **GUISenderAgent** y **GUIJSONProducer**.

En la parte inmediatamente superior de la Figura 3.5 puede consultarse la configuración por defecto pose el simulador, advierte al desarrollador de los

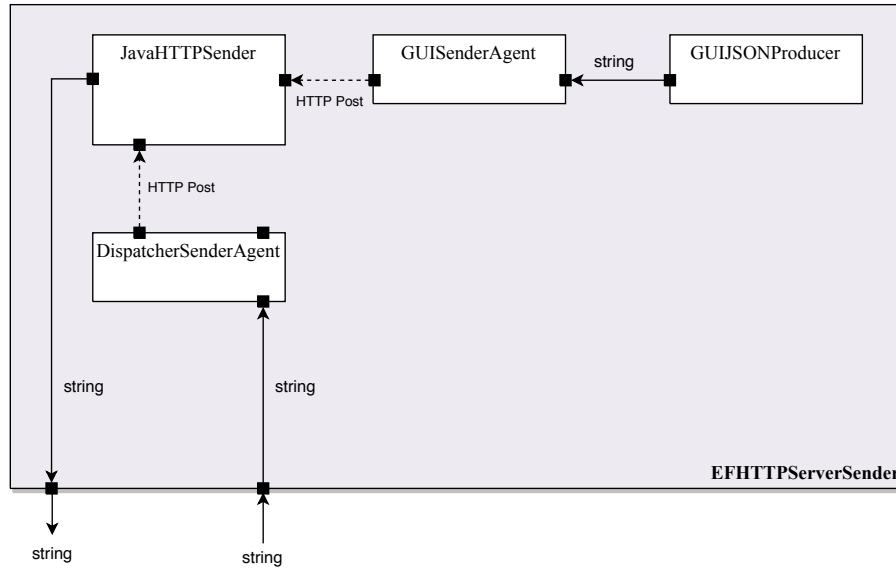


Figura 3.4: El modelo **EFHTTPServerSender** emula el cliente web que aloja la *GUI*

directorios y las opciones que se han establecido por defecto, así como el directorio del simulador al que debería acudir el propio desarrollador en caso de querer modificar algún archivo de propiedades¹.

En la parte inferior de la imagen se puede consultar la configuración establecida por defecto para el servidor. Si el archivo de propiedades del servidor no ha sido configurado, el servidor se arranca con una configuración básica: *IP*-local (127.0.0.1 en el ejemplo de la Figura 3.5) y puerto (8001 en el ejemplo de la Figura 3.5). La *IP* y el puerto indican a los clientes donde está el servidor a la espera de solicitudes. Se puede consultar en la Figura 3.5 como los modelos atómicos **DispatcherSenderAgent**, **GUISenderAgent** se conectan exitosamente a esa dirección *IP* y puerto. Para atender estas solicitudes el servidor es dotado de controladores para poder manejar las peticiones desde los clientes. Estas peticiones pueden ser de tipo *GET*, donde la solicitud va en la propia *URL* del mensaje *HTTP*, o peticiones de tipo *POST*, donde la solicitud va en el cuerpo del mensaje *HTTP*. en el caso del **EFHTTPServerSender** las peticiones son del segundo tipo.

En la Figura 3.5 también puede ser confirmada la conexión del simulador con la base de datos.

Scheduler

El modelo acoplado **Scheduler** (ver Figura 3.6) contiene dos modelos atómicos para la obtención de la propuesta mensual de colectas. El trabajo conjunto

¹Los archivos de propiedades se implementan para establecer valores de constantes que usa el simulador. Los programas los utilizan para cargar valores sobre sus variables, ya que no forman parte del código es posible cambiar los valores de esas propiedades sin tener que volver a compilar todo el programa.


```

<terminated> EFroot [Java Application] /usr/lib/jvm/java-8-openjdk-amd64/bin/java (Jun 18, 2020, 3:36:08 PM)

Default working dir: /home/nuranga/Documents/hemovigilance
All options set by default.
Posters in PDF must be stored in: /home/nuranga/Documents/hemovigilance/results/posters/
Check: /home/nuranga/Documents/hemovigilance/resources/properties/ to change the desired properties and files.

creating directory: posters
Dir created in: /home/nuranga/Documents/hemovigilance/results/posters|
# DEVS Simulation Control Version: 1.20200618
[INFO-main|00:00:00.005]: *hemovigilanceServer* Server /127.0.0.1 started on port 8001
*hemovigilanceServer* Server started at 8001
*GUISender* Connection to http://localhost:8001/echoPost created succesfully.
*DispatcherSender* Connection to http://localhost:8001/echoPost created succesfully.
url: jdbc:mysql://localhost:3306/blood_donation_hemovigilance
Connection succeeded.
*GUIJSONProducer* { \date\: 20180131, \business\: 1, \loc_id\: 10250, \name\: \"BALSICAS\",
*GUISender* { \date\: 20180131, \business\: 1, \loc_id\: 10250, \name\: \"BALSICAS\", \city
*GUISender* Response message from server: 200

```

Figura 3.5: Mensaje mostrado en al consola del programa *Eclipse* con la configuración por defecto del simulador y la confirmación de las conexiones

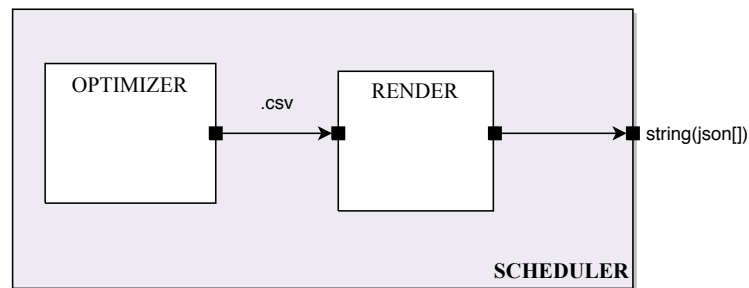


Figura 3.6: El modelo **Scheduler** alberga el motor de optimización y elabora las planificaciones de las colectas

de ambos modelos atómicos (**Optimizer** y **Render**, la descripción de los mismos se puede consultar más adelante) otorga al modelo acoplado **Scheduler** la capacidad de proveer la principal carga informativa y los datos base sobre la que el resto del sistema trabaja. Dicha carga alberga información logística y sanitaria, y obedece a dos propósitos esenciales. Por un lado está adaptada para la interacción humano máquina en la *GUI*, siendo esta entendible y editable por un humano y, por otro lado, esta adaptada técnicamente a un entorno de desarrollo de comunicaciones óptimas, tal y como se ha descrito en anteriores secciones. El **Scheduler** no solo dispondrá una propuesta inicial de planificación (original) dando inicio a la ejecución de todo el sistema, sino que a través de un evento externo de entrada generado desde el **Dispatcher** será responsable de generar nuevas propuestas evolucionadas de la original. Este procedimiento se detalla dentro de la descripción propia del modelo atómico **Optimizer**. El modelo *Scheduler* cuenta con un único puerto de salida, a través del cual es capaz de proveer al modelo **Dispatcher** de la planificación elaborada. A través de este puerto se transmite un *String* que alberga un *array* de objetos *Json*, cada uno de ellos representa una colecta de la planificación.

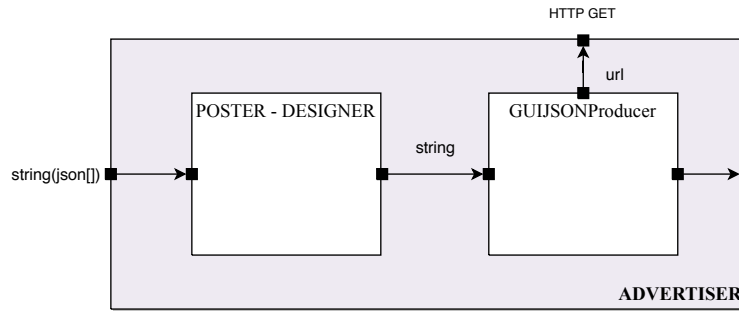


Figura 3.7: El modelo **Advertiser** genera el contenido publicitario y propagandístico de promoción de colectas

Advertiser

El modelo **Advertiser** cuenta con un único puerto de entrada dipuesto para la recepción de las colectas enviadas por el modelo *Dispatcher* y que han sido validadas por el operador del simulador. El modelo acoplado **Advertiser** contiene, también, dos modelos atómicos (**Poster-Designer** y **Messenger**) para la producción del contenido publicitario necesario para apoyar las campañas de *marketing*.

Es el encargado de procesar la disposición de las colectas que han sido validadas y en consecuencia definir el formato del contenido a distribuir por los canales de comunicación pertinentes. Según esta disposición diseña un póster de tamaño *Din A3* que incluye: la ciudad donde se celebra la colecta, el centro de hemodonación dispuesto para la extracción y los días en los que tendrá lugar el evento. El póster se almacena en una ruta local conocida por el servidor la cual devuelve frente a una petición de tipo *POST* de la *GUI*.

Con esta misma información se elabora un texto plano para ser enviado a la red y difundirlos a través de una plataforma de mensajería instantánea, *Telegram*. Para ello, se ha creado dentro de esta plataforma un *chat* de grupo. A través de la API, que dispone *Telegram* abiertamente, se obtiene el *Id* del chat de grupo y un *token* de autenticación de usuario. Estos elementos junto con el texto plano se usan para crear una *URL* con la que se establece una conexión que recoge el mensaje de texto plano de la propia *URL* y lo transmite por el chat de grupo.

Posee un solo puerto de salida para la transmisión de datos al modelo **Transportation**. En esta primera versión del **Advertiser** se ha creado, dispuesto y habilitado este puerto de salida, ya que se sabe, será necesario en un futuro comunicar el **Advertiser** con el **Transportation**, sin embargo, al no haberse desarrollado este segundo el puerto se haya inutilizado.

3.3.2. Modelos atómicos

Existen 17 diferentes tipos de modelos atómicos: *Optimizer*, *Render*, *Poster-designer*, *Messenger*, *Dispatcher*, *JavaHTTPServer*, *DispatcherSenderAgent*, *GUISenderAgent*, *GUIJSONProducer*,

Offering, Collection, Dispatcher, Transportation, Fractionation, Storage, Distribution y Utilization.

El número de procesos es tan elevado dado ya que en la mayoría de casos no se ha podido crear un modelo genérico a partir del cual replicar otros modelos. Esto se debe a que la mayoría de los procesos que intervienen en el sistema de hemovigilancia son muy singulares y concretos. La organización modular efectuada corresponde con un criterio de clasificación basado en funcionalidades objetivo.

Por ejemplo, aquellos procesos en los que se efectúan tareas de transporte se modelan bajo el mismo modelo **Transportation**, incluido el **Distribution**, el cual se denomina diferente para denotar una mayor diferencia con el resto de modelos de tipo transporte. La principal diferencia entre **Transportation** y **Distribution**, es que en el primero se transporta material médico de extracción de sangre, los profesionales médicos que los manejan y están capacitados para almacenar temporalmente y transportar sangre, y en el segundo solo se transportan bolsas desangre. En definitiva, el sistema de hemovigilancia alberga funciones muy diversas, dispares y singulares, resultando, en consecuencia, módulos de simulación en su mayoría únicos. Es por este motivo que no se encuentran módulos base que representen una plantilla fuente, a partir de la cual, generar módulos en serie que difieren entre si en ciertos aspectos, pero que su columna vertebral está erguida según un mismo patrón.

Tal y como se ha dado a entender en el inicio de este capítulo, no todos los módulos son definitivos, sino que se les ha otorgado de las capacidades mínimas necesarias para que fuese posible desarrollar un simulador funcional, centrando el trabajo en los modelos **Scheduler**, **Dispatcher**, **Advertiser** y **EFHTTPServerSender** que es donde se encuentra el foco de estudio del equipo de investigación. Cabe destacar que, dentro de la propuesta de este paradigma, el módulo **Utilization** se ha definido como una funcionalidad fuera del ámbito del simulador porque se entiende y se define dicha funcionalidad como un conjunto de acciones que no forman parte del centro de hemodonación per se, si no de los hospitales y centros de transfusión. A pesar de no haber sido codificada funcionalidad alguna propia del módulo **Utilization**, con fines de investigación, se simulará para disponer de una demanda del sistema (un consumidor). Aunque la estadística real de uso es desconocida, se podrán simular distintos escenarios para casos más o menos favorables.

Optimizer

El **Optimizer** [26] es el primero de los modelos atómicos del modelo acoplado **Scheduler** y es la fuente principal de contenido informativo. Como su propio nombre señala, el modelo atómico **Optimizador** es el encargado de generar el principal activo del simulador, una propuesta de colectas óptima, a través de la conjunción de un marco general de optimización, caracterizado por numerosos parámetros, diversas variables y delimitado por restricciones, que obtiene de una base de datos. En primera instancia generará una propuesta, según las circunstancias, lo menos condicionada posible. En posteriores iteraciones del simulador, lanzadas según

Cuadro 3.7: Información y formato de colectas almacenadas en un *CSV* (i)

<i>Year</i>	<i>Month</i>	<i>Day</i>	<i>Bisuness</i>	<i>Loc.Ic</i>	<i>Name</i>	<i>City</i>	<i>Shift</i>	<i>Type</i>
2018	1	10	1	13012	LA RAYA-PUEBLA DE SOTO	MURCIA	T	<i>Others</i>

Cuadro 3.8: Información y formato de colectas almacenadas en un *CSV* (ii)

<i>Module</i>	<i>Vehicle</i>	<i>Forecast_TBU_mean</i>	<i>Forecast_TBU_std</i>	<i>Forecast_donnors</i>	<i>Drivers</i>	<i>Admin</i>	<i>Doctors</i>	<i>Nurses</i>
A	Rápida	26	4	31	1	1	1	2

evento externo de entrada desde el **Dispatcher**, el **Optimizador** generará nuevas propuestas evolucionadas de esa primera, pero esta vez dentro de un marco general de optimización. El marco general de optimización se conjuga según las modificaciones procedentes de la *GUI* (emulada en el modelo **EFHTTPServerSender**), las cuales son interpretadas por el **Optimizador** como restricciones. Todas las planificaciones elaboradas en el **Optimizer** son almacenadas en un documento de extensión *CSV* para su procesamiento en el **Render**.

Render

El segundo modelo atómico **Render** del modelo acoplado **Scheduler** es el encargado de recibir el confeccionado calendario, procesarlo, formatearlo y, en última instancia, el encargado de adaptar esa planificación óptima para que el resto del sistema pueda entender y manejar dicha información. Para ello, toma un documento *CSV* (ver Cuadro 3.7 y 3.8) constituido por un registro que representa cada colecta. Cada registro posee varios valores separados por comas que son mapeados por el **Render** en objetos instanciados de clases **JAVA** (ver Cuadro 3.1) que puedan ser entendidos y manejados por el resto de los modelos del **RootCoupled** (ver Figura 3.2) de forma rápida, sencilla y abstraídos del uso de documentos y las capacidades necesarias para el acceso y manejo de estos documentos.

Poster-designer

El **Poster-designer** es el primero de los dos modelos atómicos que constituyen el modelo acoplado **Advertiser** es el encargado de producir en formato *PDF* un cartel propagandístico-publicitario, que alberga la información, necesaria y suficiente, para la notificación sobre la celebración de próximas colectas de donaciones (datos incluidos: localidad, centro de salud, fecha y horario). Estos carteles de elaboran cada vez que el modelo **Advertiser** recibe por su único puerto de entrada, un conjunto de colectas validadas en el **EFHTTPServerSender**. Estas colectas son procesadas por el **Poster-desginer** y agrupadas por localidad, centro de donación y día de la semana, y así poder definir el diseño del cartel. Una vez constituido el *PDF* este será impreso en formato físico, tamaño A3, para su distribución final dentro de una campaña de cartelería, cubriendo así un

canal tradicional de comunicación. En el estado actual, el contenido informativo se articula para un único contenedor (cartel tamaño A3), en un siguiente desarrollo se implementarán otros formatos físicos (carta, panfletos, ...).

Messenger

El **Messenger** es el segundo modelo atómico del modelo acoplado **Advertiser**. Su finalidad es la misma que la del **Flyer** y el funcionamiento es análogo, con la salvedad de que este módulo está orientado a canales de comunicación digitales, más acorde y afín a la cultura reinante en la era actual. Se dice análogo desde un punto de vista lógico, dado que el contenido promocional en este caso también se genera cada vez que el modelo **Advertiser** se recibe por el puerto de entrada la lista de colectas, en paralelo al modelo **Poster-designer**.

La información que se comparte es idéntica al caso anterior (datos incluidos: localidad, centro de salud, fecha y horario), pero esta vez es distribuida mediante mensajes de texto, a través de plataformas de mensajería instantánea. En el caso que ocupa se ha decidido optar por la aplicación móvil Telegram², dado que se trata de un software multiplataforma *Open Source* cuyos protocolo y *API* son públicos. Cuenta, además, con un servicio de creación y edición de *Bots*, a los que es posible dotar de las capacidades y características propias e inherentes de un canal de comunicación. De este modo, quedan cubiertas las necesidades derivadas, en este proyecto, de la necesidad de establecer canales en formato digital.

Se establece un canal (*chat* de grupo) por cada localidad al que los ciudadanos que así lo deseen puedan unirse de manera voluntaria. En este *chat* se enviarán los mensajes elaborados por el modelo *Messenger* de todos los centros de hemodonación que pertenezcan al área geográfica de la localidad.

En un futuro, otros medios digitales como el envío de correos electrónicos serán implementados, a día de hoy no es posible ya que son necesarios correos personales del público general y por el momento el CRHM no dispone de ellos. A medida que el CRHM pueda ir adquiriendo este y otros recursos será cuando se puedan implementar los nuevos canales digitales.

Los correos podrían abrir el camino al uso de herramientas *CRM* como ya se ha mencionado anteriormente en este documento, no solo para campañas publicitarias, sino para la gestión de los donantes, incluido su estado de salud y el diagnóstico del mismo. Este es solo un caso de medio de comunicación digital P2P, pero el mismo razonamiento podría aplicarse al caso de los medios de difusión o *broadcast*. Si el CRHM consigue hacerse con los perfiles de redes sociales (*Facebook*, *Twitter* o *Instagram*) de los donantes (perfiles cedidos de forma voluntaria) podrían implementarse campañas de difusión digitales más plurales, que no se limiten a una solución particular de plataforma de mensajería instantánea.

²Telegram ORG.: App, protocol and API for instant messaging. <https://telegram.org/>

Dispatcher

El modelo **Dispatcher** es el encargado de seleccionar los datos que son enviados a la *GUI* del *array* de colecciones que ha recibido por parte del modelo **Scheduler**, por uno de sus puertos de entrada habilitados al efecto. Para ello tiene disponible un puerto de salida por el que transmite al modelo **EFHTTPServerSender** *Strings* que contienen los *arrays* de objetos *Json* con la información de cada colecta y que el **EFHTTPServerSender** necesita para ser presentados por la *GUI*. Con este filtrado se consigue enviar la información mínima adecuada a la *GUI* emulada en el modelo **EFHTTPServerSender**, logrando comunicaciones eficientes. La razón de este proceso radica en que en un futuro el simulador y la *GUI* no serán ejecutados de forma local en el mismo dispositivo, sino que el simulador estará albergado en un servidor (servicio *hosting*) y la aplicación cliente será ejecutada en un lugar remoto. Es por este motivo que se ha creado el modelo **EFHTTPServerSender** que emula tanto el servidor como la *GUI* (la descripción detallada del modelo **EFHTTPServerSender** puede ser consultada en apartados anteriores) de tal forma que no sea necesario el rediseño del sistema una vez simulador y cliente web se ejecuten en máquinas diferentes, bastaría con dejar de hacer uso del modelo **EFHTTPServerSender**.

Otras de las funciones principales del **Dispatcher** es la de albergar la inteligencia y capacidad para gestionar la base de datos que se necesita para soportar el gobierno del sistema por comandos desde la *GUI*, y trabajar con la misma tal y como se ha descrito en secciones anteriores. Este ejercicio se inicia por la recepción de un evento externo, bien procedente del **Scheduler**, bien procedente de la *UI*, para lo cual, el modelo **Dispatcher** cuenta con sendos puertos de entrada.

En el primero de los casos, tanto como si se trata de la propuesta de colectas original inicial como si se trata de versiones mejoradas de la misma (según la órdenes de comandos procedentes del **EFHTTPServerSender**), el **Dispatcher** genera un registro por cada colecta en la base de datos (ver Cuadro 3.6). En la segunda de las circunstancias, el **Dispatcher** borra el registro previo de la base de datos y guarda la información procedente de la *GUI*. Se trata, únicamente, de información relativa a las ediciones que realizan desde la *GUI*, las cuales más tarde serán enviadas al **Scheduler** por uno de los dos puertos de salida que posee este modelo, donde se interpretarán como restricciones de optimización.

Por último, el **Dispatcher** resuelve cuales son las colectas que han sido aprobadas desde la *GUI* alojada en el modelo **EFHTTPServerSender** para pasar a ser publicitadas. Toda la información referente a cada colecta será enviada al **Advertiser** para alcanzar la consecución de tal objetivo, por el segundo de los puertos de salida de los que dispone el modelo **Dispatcher**.

JavaHTTPSender

Es el modelo atómico del **EFHTTPServerSender** que hace las funciones propias de un servidor. Un servidor tiene asociados diversos controladores para poder procesar las solicitudes. Cada controlador se ha registrado en una ruta concreta que representa la ubicación del servicio en este servidor. Se ha creado un

controlador raíz que muestra el estado del servidor y dos controladores adicionales más: uno para procesar peticiones *POST* (datos en el cuerpo del mensaje) y otro para procesar peticiones *GET* (datos en la *URL* del mensaje).

Este modelo posee dos entradas que lo conectan con los modelos atómicos **GUISenderAgent** y **DispatcherSenderAgent**. En este caso hablamos de entrada ya que aunque se traten de puertos este puerto no se refiere a un puerto a nivel de simulador como en el resto de casos, sino que se refiere a un puerto para el acceso de comunicaciones vía internet.

Así mismo, tiene un único puerto de salida por donde envía un *String* de objetos *Json* al modelo **Dispatcher**.

GUISenderAgent y DispatcherSenderAgent

Estos modelos atómicos se usan para el envío de *Strings* de *arrays* de objetos *Json* a través de peticiones *HTTP POST* por internet al modelo **JavaHTTPSender**. Estos modelos solo tienen este único puerto para comunicaciones salientes. De nuevo, no es un puerto desde el punto de vista de comunicaciones por internet, no es un puerto al uso de *DEVS*.

Al igual que solo poseen un puerto de salida, también solo poseen un puerto de entrada. Este puerto de entrada conecta el **GUISenderAgent** con otro modelo atómico del **EFHTTPServerSender**, el modelo **GUIJsonProducer**, y el modelo **DispatcherSenderAgent** con el modelo **Dispatcher**.

Ambos puertos de entrada sirven para la recepción de los *Strings* que deben enviar al servidor vía internet. el modelo **DispatcherSenderAgent** enviará al servidor la propuesta de colectas generada en el modelo **Scheduler** y el modelo **GUISenderAgent** enviará los comandos sobre esas colectas (actualmente es un envío forzoso que simula una modificación).

GUIJsonProducer

Este modelo emula la interacción de la operadora con la *GUI*. Esta interacción se ha descrito en secciones anteriores. Concretamente, es modelo emula que el operador del simulador pertinente ha decidido hacer una modificación sobre una colecta. Con este fin, el modelo crea un objeto *Json* que envía por el único puerto de salida que tiene al modelo *GUISenderAgent*.

Hasta este punto se han facilitado las descripciones de aquellos desarrollos planificados dentro del alcance de este proyecto y que, en consecuencia, han sido completados. Esto no significa que directamente estos mismos se encuentren concluidos de forma indefinida, es posible, incluso se cuenta con ello, que tras nuevos análisis o con el surgir paulatino de información nueva relevante se estime necesaria y prolifera la inclusión de nuevas funcionalidades dentro de estos módulos. Ya bien sea mediante la transformación de módulos existentes o con la transformación de módulos atómicos en otros acoplados (creación e implementación de nuevos

módulos), el procedimiento de implementación de nuevas funcionalidades está abierto, siempre y cuando se preserve la coherencia del sistema.

Los modelos listados a continuación constituyen el conjunto de desarrollos que quedan remanentes tras la ejecución efectiva de este proyecto. A continuación se disponen breves descripciones de cada modelo para permitir al lector configurar una foto mental del sistema en conjunto, sin entrar en detalle.

Transportation

El modelo atómico **Transportation** es el primero de los modelos a partir del cual la consecución de acciones se vuelve estrictamente lineal y de sentido único. Hasta el momento se han descrito modelos que interactúan entre sí de forma constante. Una vez un conjunto de colectas es aprobado para ser publicitado y la acción no llega a ser abortada, la consecución del resto de procesos se ejecuta de forma secuencial e irreversible.

Tal y como puede ser apreciado en la Figura 1.2, este modelo toma lugar dos veces en la cadena. Aunque hace referencia al mismo concepto de transporte, tiene objetivos bien diferenciados. En el primer caso, el modelo **Transportation** referencia el proceso mediante el cual el equipo (humano y técnico de extracción de sangre) se desplaza al punto estipulado para la efectuación de la donación. En el segundo de los casos, hace referencia al proceso a través del cual el producto resultante de la donación en sí es transportado al lugar donde se procesa y almacena. Si ambos procesos han sido definidos bajo un mismo término común, ha sido con el fin de simplificar la concepción del sistema ya que, en esta versión, estos modelos no han sido desarrollados individualmente ya que no son objeto de estudio por el equipo de investigación en estos momentos.

En resumidas cuentas, el primer modelo **Transportation** es un problema tradicional de *routing*. El segundo conlleva, además, el problema de la preservación de la sangre hasta que llega al centro. En el caso de el CRHM no es un problema de gran entidad, pero hay países (sobre todo en vías de desarrollo) en los que los autobuses siguen una ruta itineraria de varios días de duración, por zonas rurales alejadas de los núcleos principales de población donde suelen estar localizados.

En estas circunstancias, la conservación de la sangre se vuelve un aspecto crítico que debe ser analizado y tratado a conciencia. Dicho esto, en el caso de Murcia deberá aplicarse especial atención y esfuerzo en el segundo de los procesos, y esto es así, dado es durante esta segunda ejecución del **Transportation** es cuando se tienen los productos extraídos y se tiene la situación en la que la conservación de estas bolsas en condiciones óptimas es necesario.

Este modelo cuenta con un puerto de entrada y otro de salida que lo comunica con los modelos **Advertiser** y **Offering** respectivamente en su primera ejecución, y con los modelos **Collection** y **Fractionation** respectivamente en su segunda ejecución.

Offering

El modelo **Offering** virtualiza el proceso de llegada de los donantes al punto de extracción. Este es considerado como la evidencia del éxito del proceso de planificación y la campaña de marketing. Por tanto, sobre este modelo serán necesarios aplicar procesos estadísticos relativos a teoremas de colas[3] que caractericen la llegada de los donantes al punto de extracción. Por último, el donante debe hacer entrega de cierta documentación [43].

Habrán casos en los que estos documentos no presenten en su totalidad, y por ende, no se pueda efectuar la donación. En este modelo se tendrán que aplicar los pertinentes modelos estadísticos que permitan caracterizar este efecto, al que en este tipo de entornos y aproximaciones matemático-estadísticas, comúnmente, se conoce como error. Sin embargo, en la primera versión no se simulará un error estadístico sino que como primera aproximación se implementará un error medio fijo.

Este modelo cuenta con un puerto de entrada y otro de salida que lo comunica con los modelos **Transportation** y **Collection** respectivamente.

Collection

El modelo **Collection** abarca la parte médico-sanitaria del proceso, desde que se presenta la documentación personal del donante, hasta que los hemoderivados son transportados para su debido procesamiento y almacenaje. No todos los donantes que acuden a donar al punto de extracción y presentan todos los documentos en regla acaban ejerciendo este derecho, ya que pueden no cumplir las restricciones sanitarias necesarias, por ejemplo, podrían padecer anemia. Estas potenciales donaciones descartadas se denominan negativos y se tratarán como errores dentro del sistema de simulación. Estos negativos pueden ser incorrectos (falsos negativos [2]), como pueden darse por buenas candidaturas que no deberían ser lo (falsos positivos [6]). Este fenómeno es de alta relevancia dentro de la cadena dada su efecto en el resultado final en la obtención de los productos hemoderivados. Es cada vez menos común, pero todavía tienen lugar ciertos errores durante el proceso de la extracción originados por la manipulación de los activos por parte del equipo humano y técnico de extracción que hace que parte del producto se pierda o quede inservible. Estos errores también forman parte del ecosistema interno de este modelo. Al igual que en el caso del modelo **Offering** este error será modelado a través del uso de un error medio de valor fijo.

Fractionation

El modelo **Fractionation** describe el proceso a través del cual se obtienen los hemoderivados a partir de las bolsas totales de sangre obtenidas en la extracción y que se simulan en el modelo **collection**.

Tal y como se ha comentado en secciones anteriores, casi la totalidad de las donaciones son del conjunto al completo, es decir, bolsas de sangre totales. Este

modelo tendrá la función de elaborar la transformación contable de la sangre en productos hemoderivados. *In situ* creará una etiqueta con la información necesaria para el control de la caducidad así como la heredada en el momento de la extracción referente al donante.

Esta acción de vital importancia ya que servirá en futuras optimizaciones para lograr un volumen de inventario continuo para el plasma mientras se evita que el resto de los hemoderivados acaben siendo deshechos. Así mismo, el etiquetado contribuye y facilita el proceso de seguimiento (trazabilidad) de la sangre desde el donante hasta el receptor (*vein-to-vein*).

Para la simulación de este modelo, no van a ser implementados modelos estadísticos complejos que no concuerden con el nivel de madurez del análisis ejercido sobre este proceso, en su lugar, se establecerán relaciones directas y constantes que en resumen establecen que dada un valor de entrada (número de bolsas de sangre totales) se obtiene uno o varios valores de salida (número de bolsas por cada hemoderivado). Otra de las consideraciones tomadas, ha sido la no inclusión de errores en este proceso y considerarlo como perfecto en su ejecución. Los únicos errores asociados a este proceso se tienen en cuenta en el modelo QA & QC ya que se considera que no hay errores por manipulación sino que se detectan bolsas que no cumplen las condiciones de salud y seguridad establecidas.

Este modelo cuenta con un puerto de entrada y otro de salida que lo comunica con los modelos **Transportation** y QA & QC respectivamente. Se debe tener en cuenta que esta comunicación secuencial **Fractionation-QA & QC** es de carácter temporal. el modelo QA & QC no solo comprueba el resultado final del modelo **Transportation** sino que también realiza un control durante la ejecución de este segundo. Es posible que tras una investigación adecuada, se establezca que estos dos modelos trabajen en paralelo y no en serie, si finalmente se descubre que es más efectivo y que refleja mejor el comportamiento del sistema de hemovigilancia en la vida real.

QA & QC

El modelo QA & QC ejecuta el control de la calidad de la sangre y los hemoderivados y genera informes de los resultados. Así mismo, captará las bolsas defectuosas y lanzará una alarma para que estas sean descartadas.

En esta versión no se ha implementado ninguna aproximación dado que los procesos de control de calidad dependen de la implementación de técnicas muy concretas. Se requiere un análisis extenso y específico sobre estas técnicas que queda fuera del alcance de este trabajo. En un futuro, se debería resolver qué técnicas son potencialmente aplicables y si la implementación de una única técnica o metodología es suficiente o, por el contrario, es necesario o beneficioso definir un conjunto de técnicas, métodos, estándares y políticas, y cual es la combinación óptima para un sistema de hemovigilancia.

Este modelo cuenta con un puerto de entrada y otro de salida que lo comunica con los modelos **Transportation** y **Storage** respectivamente. Por razones obvias de

coherencia, el mismo razonamiento que se ha aplicado al modelo *Fractionation* debe ser efectuado sobre este modelo.

Storage

El modelo **Storage** posee casi una de las funciones más importantes del sistema en cuanto a la optimización se refiere, y es que supone el parámetro principal de referencia. Será este modelo el que registre las transacciones referentes a la llegada (donación) y salida (transfusión) de inventario. Llevar un control del estado de este inventario y la disposición de un histórico de operaciones permitirá gestionar la producción y consumo de productos hemoderivados, asegurando un inventario mínimo (demandado por cada centro de transfusiones en caso de alerta sanitaria). Para el control de inventario el modelo **Storage** dispone de las etiquetas, en las que deberá analizar la información referente a la caducidad de las unidades y descartarlas si procede.

Mientras que sobre las donaciones se posee información y este proceso puede ser hasta cierto punto modulado, el estado de la técnica no permite lo mismo para el caso de las transfusiones. En efecto, sobre los procesos que contribuyen a la consecución de extracciones ya se dispone de cierta capacidad para lograr el número de donaciones deseado. Esto se debe a que se parte de un objetivo claro, un cierto nivel de demanda.

La situación es la contraria cuando se trata de establecer el consumo, en este caso se trata de predecir el objetivo, y no de establecer las pautas para lograrlo. Durante el normal transcurso de la actividad de cualquier hospital se planifican diversas operaciones, estas requieren de transfusiones que contrarresten la pérdida de sangre de los pacientes durante la intervención. Lo que si escapa a todo control son las intervenciones que deben efectuarse con carácter urgente y que no están previstas, Entran en consideración tanto eventos masivos en los que se ven involucradas un número elevado de personas, como aquellas ocasiones en las que son muy pocos individuos (incluso uno solo de ellos) lo que requieren este tipo de servicios médicos de urgencia.

Por tanto, es importante que se lleve un registro exhaustivo de todas las salidas de inventario, no solo teniendo en cuenta las cantidades sino la distribución de estas operaciones en el tiempo. Con estos registros, inicialmente se podrá elaborar un modelo de escenario de configuración simple de salidas de inventario constantes según: tipo de grupo sanguíneo, subproducto de la sangre, *etc.* Más adelante, el sistema podría hacer uso de las distribuciones de las salidas de inventario, para incluir en el modelo la simulación de picos de demanda estacionarios según estos se han ido repitiendo a lo largo de los registros. En un punto avanzado de la técnica, podrá ser posible explotar los registros de tal manera que el sistema pueda ser capaz de modelar picos de demanda eventuales imprevistos, tratando de adelantarse a masivas emergencias sanitarias. Actualmente, esta versión del simulador registra en una base de datos los niveles de inventario de cada subproducto y bolsa de sangre y supervisa la caducidad de cada unidad almacenada, descartando cualquiera que haya caducado.

Este modelo cuenta con un puerto de entrada para la recepción de información del modelo **QA & QC** y otro dos de salida que lo comunican con el modelo **Distribution** y la base de datos. En la versión actual, la implementación del uso de la base de datos y la lógica asociada no han sido desarrolladas, adicionalmente, se ha de diseñar la estructura de datos receptora de los registros sobre el inventario procedente del modelo **Storage**.

Distribution

El modelo **Distribution** enmarca el proceso a través del cual los productos hemoderivados son distribuidos a los centros médicos para su transfusión. Este proceso es muy parecido, desde una perspectiva lógica, al proceso descrito en el segundo caso del modelo **Transportation**. La diferencia principal en este caso, es que estos transportes tienen que ver con el consumo del producto hemoderivado directamente relacionado con el nivel de inventario de los almacenes.

Actualmente, no se sabe con certeza el consumo contable real de los hospitales. Esto se debe, por ejemplo, a que muchas veces intervenciones planificadas no llegan a efectuarse (el paciente muere, se descarta la intervención del tratamiento, se anula cierta cirugía, ...) y, por tanto, esas unidades no se usan. En ocasiones, solicitan más unidades de las que realmente se necesitan sustituyendo sangre menos reciente por la más fresca.

Mediante el uso del etiquetado de unidades se podrá llevar a cabo un registro de los pedidos enviados, la fecha y volumen (número de unidades) del mismo y el hospital al que se hace la entrega. Este aspecto es imprescindible para poder mantener la trazabilidad (*vein-to-vein*). En la versión actual del simulador no se ha implementado aún esta funcionalidad.

En un futuro, este modelo contará con un puerto de entrada para la recepción de información del modelo **Storage** y otro dos de salida que lo comunican con el modelo **Utilization** y la base de datos donde llevar el registro del seguimiento de la trazabilidad.

Utilization

El modelo **Utilization** representa el uso que se da en los centros de transfusión a los productos hemoderivados. Como se ha comentado con anterioridad, este proceso es entendido como uno que no pertenece al conjunto de la hemovigilancia pero se debe tener en cuenta ya que el control de este uso y su ejecución óptima si contribuye a la eficiencia del conjunto del sistema de simulación de hemovigilancia. Esto es debido principalmente, a que un uso correcto de la sangre durante las transfusiones contribuye al establecimiento de una demanda más acorde con la realidad.

De forma lógica, este modelo posee un puerto de entrada que lo comunica con el modelo **Distribution** pero no se ha realizado, ni se prevé hacer, desarrollo alguno.

En este punto del Capítulo 3 se ha concluido con la descripción de la metodología, tras lo cual puede apreciarse el estado de madurez del desarrollo, el alcance de la versión actual y breves comentarios sobre los siguientes desarrollos e investigaciones futuras.

En el siguiente capítulo se describen las herramientas y los medios a los que se ha recurrido para desarrollar el diseño y proceder con la experimentación del mismo.

CAPÍTULO 4

Set-up experimental

La metodología descrita en el Capítulo 3 ha sido probada con datos reales gracias a que se disponía de información no comprometida cedida por el CRHM. En este capítulo se describe la implementación del desarrollo desde un punto de vista general hasta uno más específico.

El marco del simulador **RootCoupled** (ver Figura 3.2) ha sido desarrollado en su totalidad en *Java SE* ¹ usando el *IDE Eclipse* y el *JDK* 11.0.5. Para el desarrollo del simulador se ha recurrido al uso de las siguientes librerías:

- *Gson* 2.6.2 ² es una biblioteca Java que se puede usar para convertir objetos *Java* en su representación *Json*. También se puede usar para convertir una cadena *Json* en un objeto Java equivalente.
- *iText* 5.5.13.1 ³ biblioteca *Open Source* para crear y manipular archivos *PDF*.
- *MySQL* 8.0.19 ⁴ para el acceso remoto a bases de datos.
- *xDEVs* ⁵ librería *Java* para la implementación del formalismo matemático *DEVs*.

Desarrollar el simulador con *Java* permite que el código pueda ser compilado y ejecutado en cualquier sistema operativo servidor o PC convencional.

¹Oracle: Java SE documentation. <https://docs.oracle.com/en/java/javase/14/> Última visita: 17/06/2020

²Google sites: <https://sites.google.com/site/gson/gson-user-guide#TOC-0verview> Última visita: 17/06/2020

³iText: API documentaiton. <https://itextpdf.com/en/resources/api-documentation> Última visita: 17/06/2020

⁴MySQL: [Connectors](https://dev.mysql.com/doc/connectors/en/) and [APIs](#) Manual. Última visita: 17/06/2020

⁵Github:: [xdevs-lib](https://github.com/jlrisco/xdevs-lib). Última visita: 17/06/2020

4.1. Motor de optimización

Para la planificación de colectas se ha integrado un motor de optimización [26], elaborado previamente en el grupo de investigación de este mismo trabajo, que se apoya en la herramienta *IBM LOG CPLEX*. Utiliza variantes del método *SIMPLEX* y el método del punto interior, problemas de programación cuadráticos convexos y no convexos y problemas de restricción cuadrática.

El modelo es el archivo donde se definen el conjunto de datos de entrada en los que el sistema se va a basar para calcular la solución, el conjunto de parámetros que se pretende optimizar y la ecuación matemática a optimizar y que caracteriza el sistema.

Los datos de entrada que se definen en el archivo modelo y que sirven para efectuar la optimización proceden de una base de datos, facilitada por el CRHM, anonimizada con el conjunto de colectas realizadas en la Región de Murcia entre 2007 y 2017.

Como resultado el motor de optimización crea un documento de extensión *CSV* en el que escribe una a una todas las colectas de la planificación.

4.2. Graphical User Interface

Dentro del grupo de investigación se ha desarrollado otro proyecto en paralelo en el que se ha diseñado una *GUI* que se comunicará con el simulador que se ha desarrollado en este trabajo. La comunicación será de la misma forma que simula el *GUISenderAgent*.

Para esta primera versión del simulador no se va a requerir de la presentación real tangible de la información, una de las funcionalidades que posee dicha interfaz, pero si se van a necesitar los comandos que el operador introduce en el sistema a través de ella, ya que son dichos comandos los que gobiernan y restringen la planificación de colectas. Teniendo en cuenta la madurez del desarrollo de esta versión del simulador, se podría decir que estos comandos son el gobierno del propio simulador.

Es por esto que esta *GUI* es emulada en el modelo atómico *GUISenderAgent*, alojado en el modelo acoplado *EFHTTPServerSender*. El modelo *GUISenderAgent* establece una conexión con el servidor modelado por el modelo atómico *JavaHTTPServer* a través de un puerto predefinido (el 8001 en *localhost*, por defecto, si no se especifica otra) y mediante peticiones de métodos *POST* y *GET* de *HTTP*.

4.3. Telegram API

Para la implementación de la plataforma de mensajería instantánea *Telegram* se ha recurrido a la *API* que disponen abiertamente. Para ello se utilizan lo que en *Telegram* llaman *Bots*. Los *Bots* son aplicaciones de terceros que se ejecutan dentro de *Telegram*. Los usuarios pueden interactuar con *Bots* enviándoles mensajes, comandos y solicitudes en línea. En el caso del simulador desarrollado, el *Bot* se utiliza solo para el envío de contenido informativo a canales y por tanto no se han habilitado comandos para la interacción con dicho *Bot*.

Los *Bots* se controlan utilizando solicitudes *HTTPS* a la *API*. En el caso del simulador desarrollado se ha implementado esta inteligencia dentro del modelo *Advertiser*. Todo lo que se necesita para crear una solicitud *HTTPS* es construir una *URL*, por tanto, se trata de un mensaje de tipo solicitud *HTTP* con método *GET*. Esto significa que el contenido del mensaje irá incluido en la propia *URL* y no en el cuerpo del mensaje de solicitud *HTTP*. Para la publicación de un texto en un *chat* de *Telegram* basta con tomar el identificador del *chat*, un *token* de autenticación de usuario, el propio contenido del mensaje que se quiere enviar y la cabecera de la *URL* que facilita *Telegram*. *Telegram* no solo facilita la cabecera de la *URL* a través de su *API*, también se pueden consultar el identificador y el *token*.

Para la experimentación se ha creado un canal denominado "Donantes", en la implementación del sistema, el CRHM deberá dar de alta un canal por cada centro urbano.

CAPÍTULO 5

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados de todas las etapas de la metodología aplicada para la resolución de los problemas que plantea el proyecto. En esencia, proveer la infraestructura para el soporte de la experimentación con el simulador y la integración del motor de optimización (ya disponible) y la *GUI* (desarrollándose paralelamente al simulador de este trabajo) de otros trabajos del grupo de investigación en el que se encuentra el trabajo que se describe en este documento.

En efecto, cuando el profesional del CRHM arranque el sistema se le presenta la planificación de colectas propuesta por el motor de optimización. Tal y como se ha descrito en capítulos anteriores en este mismo documento, en esta versión del simulador la *GUI* es emulada con el modelo **GUISenderAgent** del modelo acoplado **EFHTTPServerSender**. Por tanto, no es posible mostrar un ejemplo de la propia *GUI*, es por ello que se dispone del resultado (hoja de cálculo) del motor de optimización que es la fuente de del contenido informativo que se muestra en esta *GUI* ver Figura 5.1).

El profesional médico revisará por la *GUI* en la pantalla de su equipo un calendario con las colectas. Tras analizar dicho calendario tendrá la opción de

2	2018,1,2,1,,CENTRO COMERCIAL NUEVA CONDOMINA - MAÑANA,MURCIA,M,Others,A,DTN,91,14,112,1,1,1,5				
3	2018,1,2,1,,I.E.S MAR MENOR,SAN JAVIER,M,Education,C,RÁpida,23,3,23,1,1,1,2				
4	2018,1,2,1,30603,LA HOYA,LA HOYA,T,Others,D,FXT,67,10,78,1,1,1,4				
5	2018,1,2,1,44300,YECLA,YECLA,T,Others,D,Vito,33,5,33,1,1,1,2				
6	2018,1,3,1,14800,CIUDAD SANITARIA VIRGEN DE LA ARRIXACA - MAÑANA,MURCIA,M,Clinic,A,DTN,50,8,54,1,1,1,3				
7	2018,1,3,1,10500,ALCANTARILLA,ALCANTARILLA,T,Others,A,FXT,66,10,80,1,1,1,4				
8	2018,1,3,1,13333,CONSULTORIO LA ALGAIDA,LA ALGAIDA,T,Others,B,Vito,45,7,53,1,1,1,2				
9	2018,1,3,1,13030,MONTEAGUDO,MONTEAGUDO,T,Others,A,RÁpida,42,6,50,1,1,1,2				
10	2018,1,4,1,,COFRADIA DE NUESTRO PADRE JESUS NAZARENO,MURCIA,M,Others,B,RÁpida,20,3,23,1,1,1,2				
11	2018,1,4,1,,KERNEL EXPORT,LOS ALCAZARES,M,Others,A,Vito,33,5,33,1,1,1,2				
12	2018,1,4,1,30812,LA PACA,LA PACA,T,Others,D,FXT,38,6,45,1,1,1,2				
13	2018,1,4,1,13044,SANGONERA LA VERDE,SANGONERA LA VERDE,T,Others,A,DTN,129,19,149,1,2,1,8				
14	2018,1,5,1,,CAJA MURCIA,ESPINARDO,M,Others,A,Vito,29,4,37,1,1,1,2				
15	2018,1,5,1,,FUNCION PUBLICA,MURCIA,M,Others,A,RÁpida,36,5,36,1,1,1,2				
16	2018,1,5,1,13600,SAN PEDRO DEL PINATAR,SAN PEDRO DEL PINATAR,T,Others,C,FXT,99,15,114,1,1,1,5				
17	2018,1,5,1,13018,ZARANDONA,MURCIA,T,Others,A,DTN,56,8,64,1,1,1,3				
18	2018,1,8,1,19025,CONSEJERIA DE HACIENDA,MURCIA,M,Others,A,FXT,40,6,47,1,1,1,2				

Figura 5.1: Ejemplo muestra del resultado de algunas de las colectas propuestas por el optimizador

+ Opciones									
← T →									
			id	json_id	locked_as_it	locked_modified	validated_as_it	validated_modified	advertising
<input type="checkbox"/>	Editar	Copiar	Borrar	1	20200130_10003	1	0	0	0
<input type="checkbox"/>	Editar	Copiar	Borrar	2	20200130_10001	NULL	NULL	NULL	0
<input type="checkbox"/>	Editar	Copiar	Borrar	3	20200131_0330	NULL	NULL	NULL	0
<input type="checkbox"/>	Editar	Copiar	Borrar	4	20200131_1512B	NULL	NULL	NULL	0

Figura 5.2: Representación de la tabla de la base de datos con los registros de la propuesta

+ Opciones									
← T →									
				id	json_id	locked_as_it	locked_modified	validated_as_it	validated_modified
<input type="checkbox"/>	Editar	Copiar	Borrar	1	20200130_10003	1	0	0	0
<input type="checkbox"/>	Editar	Copiar	Borrar	2	20200130_10001	1	NULL	1	NULL
<input type="checkbox"/>	Editar	Copiar	Borrar	4	20200131_1512B	0	1	NULL	NULL

Figura 5.3: Representación de la tabla de la base de datos con los registros de los comandos

editarlos, podrá bloquear las colectas, validarlas o modificar datos de cada colecta (fecha y hora). El significado y los efectos de estas acciones pueden ser consultados en el Capítulo 3.

Antes de que la propuesta de colectas planificada por el optimizador llegue a la *GUI* el flujo de la información atraviesa el modelo *Dispatcher*. Se recuerda al lector que este modelo se encargaba de la gestión de la base de datos para el registro y control de los comandos en un entorno de persistencia. Un ejemplo del estado de la tabla de esa base de datos se puede consultar en la Figura 5.2.

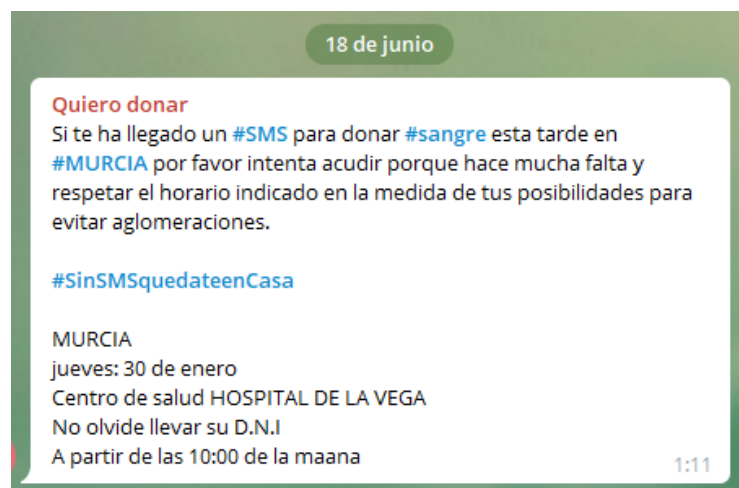


Figura 5.4: Ejemplo de mensaje promocional de una colecta enviado al público por Telegram

Cuando el profesional médico introduce los comandos estos se envían en formato *Json* (ver Lista 2), desde la *GUI* al *Dispatcher*. Este último modelo actualizará la base de datos (ver Figura 5.3).

Si uno de los comandos contenidos en los *Json* se trata de una validación por parte del profesional médico, significa que la propuesta que ha hecho el planificador ha sido aceptada por el profesional sanitario y, además, este mismo ha comprobado que la colecta se puede efectuar y, por tanto, es el momento de generar el contenido promocional.

Tal y como se ha descrito en capítulos anteriores esta publicidad consistirá en el diseño de un cartel (ver Figura 1 del Anexo I) y el envío de un mensaje de texto (ver Figura 5.4) a través de una plataforma de mensajería instantánea.

CAPÍTULO 6

Conclusiones y líneas de futuro

6.1. Conclusiones

Como objetivos fundamentales de este proyecto se plantean (i) el desarrollo de una infraestructura de simulación, (ii) el modelado, diseño, desarrollo de los procesos de planificación y promoción de colectas y (iii) integración un motor de optimización y una *GUI*

Tras la ejecución efectiva de este trabajo se ha demostrado que es posible la concepción y desarrollo de un modelo virtualizado de un sistema de la vida real. Ha sido posible integrar los desarrollos de otros trabajo, como lo son el motor de optimización y la *GUI*, a través de la provisión de un infraestructura adaptada y un modelo de comunicación adecuado de manera sencilla.

La propia naturaleza del entorno de simulación permite diseñar, desarrollar, implementar dichos diseños y experimentar con su rendimiento. Así queda reflejado para el caso de la *GUI*, para el desarrollo del simulador no era necesario su uso, sin embargo, si era necesario emular su comportamiento. En este trabajo se ha podido experimentar, de manera simulada, con las interacciones entre humano y máquina mediante el uso de la técnica *SIL/SITL*. Tras el modelado de la *GUI* se han podido desarrollar las mecánicas subyacentes para disponer las capacidades de gobierno que se iban a ejercer desde esta. Como resultado de la experimentación de los comportamientos, se puede confiar con total seguridad que cuando se haga la implementación de la *GUI* real, el sistema al completo estará preparado funcionalmente para soportar el trabajo conjunto de las tres partes implicadas: el motor de optimización, la *GUI* y el simulador; sin la necesidad de realizar rectificación alguna o tareas de desarrollo adicionales.

Finalmente, se ha logrado desarrollar un simulador de un centro de hemodonación, del cual se ha hecho uso para la experimentación con datos reales cedidos de manera altruista por el Centro regional de Hemodonación de Murcia. Este simulador esta facultado para su directa implementación y para permitir estudiar potenciales modelos de optimización susceptibles de ser integrados en el centro previa simulación. Se ha logrado integrar el simulador con una base de datos, así como

la comunicación con un modelo de optimización y una *GUI*. Por otro lado, se ha conseguido generar publicida del centro de hemodonación de manera automatizada: póster y *BOT* de *Telegram* para donantes de una ciudad. Así mismo, se ha conseguido la simulación de un servidor para la comunicación con la *GUI*. Todo ello ha sido logrado mediante el uso de DEVS que facilita el soporte de formalismo matemático.

6.2. Líneas futuras

Del conocimiento extraído de la experimentación con datos reales cedidos por el CRHM, ha sido posible descubrir el potencial rendimiento de explotación que estos datos esconden. Esta configuración y disposición permiten sacar el mayor rendimiento posible a los recursos de los que ya se dispone.

Este idea suscita una teoría a priori razonable. A mayor cantidad de recursos, o en su defecto, a mayor acceso a recursos mayor rendimiento total resultante. Esto no es cierto del todo, más no siempre significa mejor y menos no siempre es sinónimo de insuficiente. Desde un punto de vista lógico-teórico, en un entorno enfocado a la optimización, se busca una solución óptima de una forma eficiente por naturaleza. Por tanto, la clave reside en disponer de los medios eficaces para la obtención de dicha solución y la cantidad de recursos adecuada con la que lograr esta solución de la manera más eficiente posible.

Con todo ello, se espera que el simulador sea capaz de crear nuevos conceptos o proponer alternativas a las que se presentan en el día a día y que son difíciles y costosas de probar. Un simulador es capaz de trabajar no solo con lo que dispone y con lo que ha sido provisto, también de plantear nuevos escenarios.

En consecuencia, nace la teoría del uso de nuevos recursos adicionales para la ejecución de experimentaciones de rendimiento.

Será muy interesante para el CRHM poder aplicar esta teoría basada en suposiciones a priori. No solo trabajar sobre el simulador con datos reales como los vehículos de los que ya se disponen, las capacidades de almacenamiento de los mismos y de los centros de hemodonación, si dichos vehículos disponen o no de refrigeración o, que la ruta no sea itinerante, ..., sino hacer uso de datos que no representan la realidad que se vive. Ejemplos de ello son el uso de otro tipo de unidades móviles con otras capacidades de almacenamiento, que si cuente con capacidad de refrigeración, la implementación de rutas itinerantes, el uso de un número mayor de profesionales sanitarios y administrativos para la atención de los puntos de extracción, la implementación de otros estándares de calidad basados en técnicas de control de calidad diferentes (una nueva técnica o un conjunto de ellas), un proceso de fraccionamiento novedoso, estudiar la viabilidad de acudir a nuevos puntos de extracción y su impacto (por ejemplo nuevos centros comerciales, empresas), o por el contrario dejar de visitar los no tan eficientes (pequeñas poblaciones, por ejemplo) *etc.*

En un futuro será posible poner a prueba todas las suposiciones que vayan surgiendo. Es el principal potencial de este simulador, te permite probar todas las

alternativas nuevas que quizás en un inicio no estaban disponibles o no se habían concebido o usar aquellas que si lo estaban pero que por algún motivo no se hicieron uso de ellas, por ejemplo, porque su rendimiento y resultados no habían sido probados.

Permitirá modelar y predecir comportamientos de las masas de donantes ante epidemias, el impacto de las convocatorias (publicidad) en las redes sociales. Permitirá estudiar el impacto de los propios sanitarios en la tasa de donantes rechazados (por criterios subjetivos del sanitario) y conformar equipos de trabajo equilibrados.

En definitiva, se abre la posibilidad de iniciar numerosas investigaciones que, haciendo uso del simulador, modelen casi infinitos posibles escenarios y todas sus configuraciones, experimentar a partir de ellos y, finalmente, resolver cuales de todas las variables nuevas han probado su utilidad y contribución a la búsqueda de una solución óptima de la manera mas eficiente posible.

Los resultados obtenidos de la propia experimentación, no solo permitirán corroborar una suposición o teoría, sino que servirán de aval para poder justificar la implementación de mejoras, adquisición de equipo o la contratación misma de nuevo personal sanitario.

Bibliografía

- [1] European Medicines Agency. Guideline on plasma-derived medicinal products. 2011.
- [2] Sharma R. Al Shaer, L. and M. AbdulRahman. Analysis of blood donor pre-donation deferral in dubai: characteristics and reasons. journal of blood medicine. Journal of blood medicine, 8:55, 2017.
- [3] Edgar Alfonso, Xiaolan Xie, and Vincent Augusto. A simulation-optimization approach for capacity planning and appointment scheduling of blood donors based on mathematical programming representation of event dynamics. In 2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), pages 728–733. IEEE, 2015.
- [4] Edgar Alfonso, Xiaolan Xie, Vincent Augusto, and Olivier Garraud. Modeling and simulation of blood collection systems. Health care management science, 15(1):63–78, 2012.
- [5] Edgar Alfonso, Xiaolan Xie, Vincent Augusto, and Olivier Garraud. Modelling and simulation of blood collection systems: improvement of human resources allocation for better cost-effectiveness and reduction of candidate donor abandonment. Vox Sanguinis, 104(3):225–233, 2013.
- [6] Afnan K AlNouri, Lamees A Maghrabi, Samah S Hamdi, Shereen M Abd El-Ghany, and Khalid A AlNouri. Analysis of the most common causes of blood donor deferral in northern jeddah: a single-center study. Journal of blood medicine, 10:47, 2019.
- [7] Rubendran Amarasingham, George R Oliver, Anand R Shah, Vaidyanatha Siva, Brian O Lucena, Monal Shah, Praseetha Cherian, Spencer Ballard, and Jason McGinn. Holistic hospital patient care and management system and method for automated staff monitoring, July 30 2015. US Patent App. 14/682,705.
- [8] Felipe Baesler, Matías Nemeth, Cristina Martínez, and Alfonso Bastías. Analysis of inventory strategies for blood components in a regional blood center using process simulation. Transfusion, 54(2):323–330, 2014.
- [9] Rodolfo Baggio, Chris Cooper, Noel Scott, and Magda Antonioli Corigliano. Advertising and word of mouth in tourism, a simulation study. A. Fyall, M.

- Kozak, L. Andreu, J. Gnoth, & S. Lebe, Marketing innovations for sustainable destinations, pages 13–22, 2009.
- [10] Ruibin Bai, Edmund K Burke, Graham Kendall, Jingpeng Li, and Barry McCollum. A hybrid evolutionary approach to the nurse rostering problem. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 14(4):580–590, 2010.
- [11] L Barbolla, E Contreras, and M Pujol. Estructura, función, organización, gestión y legislación de las unidades de transfusión. Organismos relacionados con la transfusión. Hemovigilancia. Manual práctico de medicina transfusional. Madrid: Acción médica, pages 19–37, 2002.
- [12] Jaime Barceló, Hanna Grzybowska, and Sara Pardo. Vehicle routing and scheduling models, simulation and city logistics. In Dynamic Fleet Management, pages 163–195. Springer, 2007.
- [13] Jacob Barhak, Deanna JM Isaman, Wen Ye, and Donghee Lee. Chronic disease modeling and simulation software. Journal of biomedical informatics, 43(5):791–799, 2010.
- [14] Remigio Berruto, Paolo Brandimarte, and Patrizia Busato. Learning inventory control rules for perishable items by simulation-based optimization. In Advances in Optimization and Decision Science for Society, Services and Enterprises, pages 433–443. Springer, 2019.
- [15] Joseph T Buck, Soonhoi Ha, Edward A Lee, and David G Messerschmitt. Ptolemy: A framework for simulating and prototyping heterogeneous systems. 1994.
- [16] Thierry Burnouf. Modern plasma fractionation. Transfusion medicine reviews, 21(2):101–117, 2007.
- [17] Gabriele Calizzani, Samantha Profili, Fabio Candura, Monica Lanzoni, Stefania Vaglio, Livia Cannata, Liviana Catalano, Rosa Chianese, Giancarlo M Liumbruno, and Giuliano Grazzini. Plasma and plasma-derived medicinal product self-sufficiency: the italian case. Blood Transfusion, 11(Suppl 4):s118, 2013.
- [18] Lifei Cheng and Marco A Duran. Logistics for world-wide crude oil transportation using discrete event simulation and optimal control. Computers & chemical engineering, 28(6-7):897–911, 2004.
- [19] Jeffrey B Cooper. Pumpkin carving, patient safety, and simulation. Simulation in Healthcare, 15(3):139–140, 2020.
- [20] Mark HA Davis. Markov models & optimization, volume 49. CRC Press, 1993.
- [21] Gerard De Jong and Moshe Ben-Akiva. A micro-simulation model of shipment size and transport chain choice. Transportation Research Part B: Methodological, 41(9):950–965, 2007.

- [22] G Delage, G Myhal, Y Grégoire, and G-M Simmons-Coley. Donors' psychological reactions to deferral following false-positive screening test results. Vox sanguinis, 107(2):132–139, 2014.
- [23] Rong Du, Zhiwen Yu, Tao Mei, Zhitao Wang, Zhu Wang, and Bin Guo. Predicting activity attendance in event-based social networks: Content, context and social influence. In Proceedings of the 2014 ACM international joint conference on pervasive and ubiquitous computing, pages 425–434, 2014.
- [24] David M Eddy and Leonard Schlessinger. Archimedes a trial-validated model of diabetes. Diabetes care, 26(11):3093–3101, 2003.
- [25] Albert Farrugia and Daniela Scaramuccia. The dynamics of contract plasma fractionation. Biologicals, 46:159–167, 2017.
- [26] Eduardo Fernández García. Diseño e implementación de una herramienta de modelado y optimización para ayudar a la planificación de colectas de un centro de hemodonación. Madrid: E. Fernández García, 2019.
- [27] Hanno Friedrich. Simulation of logistics in food retailing for freight transportation analysis. 2010.
- [28] Giuliano Grazzini, Anna Ceccarelli, Deanna Calteri, Liviana Catalano, Gabriele Calizzani, and Americo Cicchetti. Sustainability of a public system for plasma collection, contract fractionation and plasma-derived medicinal product manufacturing. Blood Transfusion, 11(Suppl 4):s138, 2013.
- [29] Giuliano Grazzini, Pier Mannuccio Mannucci, and Fabrizio Oleari. Plasma-derived medicinal products: demand and clinical use. Blood Transfusion, 11(Suppl 4):s2, 2013.
- [30] Mohammed Hadwan and Masri Ayob. A constructive shift patterns approach with simulated annealing for nurse rostering problem. In 2010 International Symposium on Information Technology, volume 1, pages 1–6. IEEE, 2010.
- [31] Ana Paula Iannoni and Reinaldo Morabito. A discrete simulation analysis of a logistics supply system. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 42(3):191–210, 2006.
- [32] Sheldon H Jacobson, Shane N Hall, and James R Swisher. Discrete-event simulation of health care systems. In Patient flow, pages 273–309. Springer, 2013.
- [33] June Young Jung, Gary Blau, Joseph F Pekny, Gintaras V Reklaitis, and David Eversdyk. A simulation based optimization approach to supply chain management under demand uncertainty. Computers & chemical engineering, 28(10):2087–2106, 2004.
- [34] K Katsaliaki and SC Brailsford. Using simulation to improve the blood supply chain. In Operational Research for Emergency Planning in Healthcare: Volume 1, pages 353–372. Springer, 2016.

- [35] Marieangela C. Wilson Allison Blair Timothy J. Satchwell Marjolein Meinders Nicola Cogan Sabine Kupzig Ryo Kurita Yukio Nakamura Ashley M. Toye David J. Anstee Kongtana Trakarnsanga, Rebecca E. Griffiths and Jan Frayne. An immortalized adult human erythroid line facilitates sustainable and scalable generation of functional red cells. Nature Communications volume 8, 2017.
- [36] HA Krebs. Chemical composition of blood plasma and serum. Annual review of biochemistry, 19(1):409–430, 1950.
- [37] S Kundu, M Mahato, B Mahanty, and S Acharyya. Comparative performance of simulated annealing and genetic algorithm in solving nurse scheduling problem. In Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, volume 1, pages 96–100, 2008.
- [38] Arnaud Legrand, Loris Marchal, and Henri Casanova. Scheduling distributed applications: the simgrid simulation framework. In CCGrid 2003. 3rd IEEE/ACM International Symposium on Cluster Computing and the Grid, 2003. Proceedings., pages 138–145. IEEE, 2003.
- [39] Richard B Lipton, Walter F Stewart, and Ann I Scher. Epidemiology and economic impact of migraine. Current medical research and opinion, 17(sup1):s4–12, 2001.
- [40] Carmen Martín-Vega. ¿ qué es la hemovigilancia?
- [41] Ashkan Negahban. A hybrid simulation framework for the newsvendor problem with advertising and viral marketing. In 2013 Winter Simulations Conference (WSC), pages 1613–1624. IEEE, 2013.
- [42] John Paul Oddoye, Dylan F Jones, Mehrdad Tamiz, and P Schmidt. Combining simulation and goal programming for healthcare planning in a medical assessment unit. European Journal of Operational Research, 193(1):250–261, 2009.
- [43] World Health Organization et al. Blood donor selection: Guidelines on assessing donor suitability for blood donation 2012. WHO: Geneva, 2019.
- [44] Andres F Osorio, Sally C Brailsford, and Honora K Smith. A structured review of quantitative models in the blood supply chain: a taxonomic framework for decision-making. International Journal of Production Research, 53(24):7191–7212, 2015.
- [45] Andres F Osorio, Sally C Brailsford, Honora K Smith, and John Blake. Designing the blood supply chain: how much, how and where? Vox sanguinis, 113(8):760–769, 2018.
- [46] Andres F Osorio, Sally C Brailsford, Honora K Smith, Sonia P Forero-Matiz, and Bernardo A Camacho-Rodríguez. Simulation-optimization model for production planning in the blood supply chain. Health care management science, 20(4):548–564, 2017.

- [47] Carlo Petrini. Production of plasma-derived medicinal products: ethical implications for blood donation and donors. Blood Transfusion, 12(Suppl 1):s389, 2014.
- [48] Paul E Phrampus. Simulation and integration into patient safety systems, 2018.
- [49] José L Risco-Martín, M Jesús, Saurabh Mittal, and Bernard P Zeigler. eudevts: Executable uml with devs theory of modeling and simulation. Simulation, 85(11-12):750–777, 2009.
- [50] Anthony Roesch, Nicolas G Bracco, Todd W Fitz, Charles Siconolfi, Lauren McKenna, and Charles H Ingrim. Healthcare system planning tool, March 4 2014. US Patent 8,666,771.
- [51] Jyrki S Ryttilä and Karen M Spens. Using simulation to increase efficiency in blood supply chains. Management Research News, 2006.
- [52] Islam Saleh. Optimization of Blood Supply Chain Under Uncertainty. PhD thesis, Faculty of Graduate Studies and Research, University of Regina, 2018.
- [53] Stephanie Sapp, Jon Vaver, Minghui Shi, and Neil Bathia. Dass: Digital advertising system simulation. Technical report, Google Inc., 2016.
- [54] W Schneider, D Wolter, and LJ McCarty. Alternatives for plasma fractionation 1. Vox sanguinis, 31(2):141–151, 1976.
- [55] Robert E Shannon. Systems simulation; the art and science. Technical report, 1975.
- [56] Yuriy Sherstennikov, Tatyana Rudyanova, Liliia Barannyk, Victoriia Datsenko, and Lyudmyla Novikova. Management of an advertising campaign based on the model of the enterprise’s logistic system. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(3):40–49.
- [57] Arianna Simonetti, Richard A Forshee, Steven A Anderson, and Mark Walderhaug. A stock-and-flow simulation model of the us blood supply. Transfusion, 54(3pt2):828–838, 2014.
- [58] Gabriel Enrique Soto and John Albert Spertus. Methods and systems for utilizing prediction models in healthcare, October 15 2013. US Patent 8,560,281.
- [59] Gabriel Enrique Soto and John Albert Spertus. Systems and methods for generating health predictor models, February 13 2014. US Patent App. 13/968,915.
- [60] Jack GAJ Van Der Vorst, Seth-Oscar Tromp, and Durk-Jouke van der Zee. Simulation modelling for food supply chain redesign; integrated decision making on product quality, sustainability and logistics. International Journal of Production Research, 47(23):6611–6631, 2009.
- [61] JGAJ Van Der Vorst, D-J van der Zee, and S-O Tromp. Simulation modelling for food supply chain redesign. In Delivering performance in food supply chains, pages 387–415. Elsevier, 2010.

- [62] Anthony Virtue, Thierry Chausalet, and John Kelly. Healthcare planning and its potential role increasing operational efficiency in the health sector: A viewpoint. Journal of Enterprise Information Management, 26(1-2):8–20, 2013.
- [63] Gabriel A Wainer, Rami Madhoun, and et al. Distributed simulation of devs and cell-devs models in cd++ using web-services. Simulation Modelling Practice and Theory, 16(9):1266–1292, 2008.
- [64] Chloe Walsh, Sinead Lydon, Dara Byrne, Caoimhe Madden, Susan Fox, and Paul O'Connor. The 100 most cited articles on healthcare simulation: a bibliometric review. Simulation in Healthcare, 13(3):211–220, 2018.
- [65] Bernard P Zeigler, Herbert Praehofer, and Tag Gon Kim. Theory of modeling and simulation: integrating discrete event and continuous complex dynamic systems. Academic press, 2000.
- [66] MengChu Zhou. Modeling, analysis, simulation, scheduling, and control of semiconductor manufacturing systems: A petri net approach. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 11(3):333–357, 1998.

Parte I

Anexos

Diseño del póster promocional



SIGUENOS EN
  Twitter: @donarsangreMU
 Facebook: Donantes de Sangre de la Región de Murcia
 Descubre más información en... 

**TU SANGRE
SIEMPRE
HACE FALTA**

**DONACIÓN DE SANGRE
MURCIA**

jueves: 30 de enero

**Centro de salud HOSPITAL DE LA
VEGA**

No olvide llevar su D.N.I

A partir de las 10:00 de la maana

www.murciasalud.es/crh • crh@carm.es

Figura 1: Ejemplo del diseño del póster promocional de una colecta (tamaño DIN A3 y formato PDF), resultado de la validación de una colecta y generado automáticamente por el Advertiser

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 este simulador lleva asociadas una serie de implicaciones en distintos ámbitos. Tal y como se muestra a continuación, no solo tiene impacto en el desarrollo de la actividad del centro, sino que el alcance de la influencia del mismo sobrepasa esta frontera, implicando a distintos sectores de la sociedad.

El continuo proceso de globalización que experimenta de forma constante la sociedad actual, la pluralidad de recursos y de medios para acceder a los mismos, ha impreso sobre dicha sociedad la sensación de que la información posee una condición ubicua de fácil acceso. Este progreso ha contribuido e influenciado la aceleración del proceso de difuminación de las fronteras que delimitan los diferentes sectores económicos. En el caso de este trabajo, lo que podría parecer una simple herramienta ofimática para la simulación de un sistema de hemovigilancia, lleva tras de sí un gran impacto.

Descripción de impactos relevantes relacionados con el proyecto

El impacto del simulador se puede evaluar entorno a tres ejes principalmente, según el punto de vista.

Por un lado, el impacto social. La importancia que tienen la sangre y, en particular, el plasma en el sistema médico es muy elevada. Sin estos recursos, muchos de los procesos que hoy en día se realizan con total normalidad podrían afectar negativamente el estado de salud y bienestar social, o incluso llegar a poner 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 el presente simulador, 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 o el uso de unidades móviles que bien podrían ser de propulsión eléctrica. 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. El plasma y la obtención de sangre, tal y como se ha comentado en el Capítulo 1, tienen un papel fundamental para la fabricación de medicamentos y, además son fundamentales para garantizar también el tratamiento [11] a los pacientes con enfermedades oncológicas o en grandes operaciones quirúrgicas, respectivamente. Por lo tanto, probar que la definición del nuevo paradigma de hemovigilancia y su rendimiento en una implementación real aseguran el desarrollo de la cadena transfusional de manera óptima, se torna indispensable para asegurar un correcto funcionamiento del sistema de sanitario.

El simulador, consigue emular un entorno que permite experimentar el proceso de optimización de una planificación óptima para la recolección de bolsas de sangre cada día, asegurando así que las necesidades del Centro Regional de Hemodonación se cubren y 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 1—. El simulador, además de permitir definir una planificación óptima de colectas, garantiza que se crea el contenido adecuado para la promoción de dichas colectas y, de este modo, hacer saber a todos los potenciales donantes que tienen la oportunidad de ejercer voluntariamente su derecho a la donación, si así lo desean.

Conclusiones

El desarrollo del simulador no solo ha producido una mejora en las capacidades del centro —sobre todo los objetivo principales de elaborar de forma conjunta entre el humano y la máquina un planificación de colectas óptima y la campaña de promoción de la misma—, sino que ha mejorado otros parámetros sociales tan importantes como los estudiados en el caso. Con la dinámica desarrollada por el simulador 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	300	21 %	63
Ordenador personal (software incluido)	1200,00	16.66 %	199,90
Coste total:			262,9

Cuadro 1: Presupuesto de los recursos materiales

Costes de mano de obra

Para la realización del proyecto es necesaria la intervención de un Junior Developer encargado de la realización de la aplicación móvil, un Data Analyst que se encargue del análisis de los datos y su tratamiento y un Neurólogo supervisando la investigación. Este perfil se enmarca dentro del grupo de cotización 1 del Régimen General de Seguridad Social ¹, 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
Junior engineer	250	15	3.750,00
Médico	50	20	1.000,00
Coste total:			4.750,00

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.

Concepto	Coste
Recursos materiales	262,9
Mano de obra	4.750,00
Total	5.012,9

Cuadro 3: Coste total de los recursos

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.

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.

¹Seguridad Social Española (Spanish): <http://www.seg-social.es/wps/portal/wss/internet/Trabajadores/CotizacionRecaudacionTrabajadores/36537> Última visita: 18/06/2020

Concepto	Coste
Presupuesto de ejecución material	5.012,9
Gastos generales (16 % del P.E.M.)	802,07
Beneficio industrial (6 % del P.E.M.)	300,78
Total presupuesto de ejecución por contrata	6.115,75€

Cuadro 4: Gastos generales y beneficio industrial

Concepto	Coste
Presupuesto Subtotal	6.115,75
I.V.A. (21 %)	1.284,31
Presupuesto total	7.400,06€

Cuadro 5: Honorarios y presupuesto total

Madrid, 18 de junio de 2020

Fdo.: Iñaki Uranga Herrandorena