



---

**Universidad de Valladolid**

**Escuela de Ingeniería Informática**

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Informática

Mención en Computación

**Aplicación de la simulación de  
eventos discretos en el sector  
sanitario. Construcción de un gemelo  
digital para el proceso de  
extracciones de laboratorio**

Autor:

D. Christian Berruezo Fernández

Tutor:

D. Pablo Federico Sánchez Mayoral



*A mi familia y en especial a mi padre, allí donde estés, siempre serás mi ángel de la guarda.*



# Agradecimientos

Mis primeras palabras no pueden ser sino de agradecimiento y compromiso.

*A D. Diego Vecillas Martín, mi tutor del Hospital Universitario Río Hortega (HURH) por haber confiado en mí en todo momento para la realización de proyectos conjuntos, además, por su inestimable ayuda, confianza y enseñanza, sin las cuales hubiera sido imposible la realización de este trabajo. Ante todas las dificultades que se han presentado en todo este tiempo, siempre ha estado dispuesto a dedicarme su tiempo y su conocimiento. Su importante aporte y participación ha facilitado las cosas para que este trabajo llegue a un feliz término. Este trabajo es parte tuya. Me faltarían días en mi vida para mostrarle todo mi agradecimiento.*

*Quisiera agradecer también a varias personas la ayuda que me han prestado en la realización de este Trabajo de Fin de Grado. Entre ellas, y en primer lugar, a mis profesores, por todo lo que me han enseñado y lo que me han transmitido durante estos años.*

*Gracias a todo el personal que he conocido en el HURH, sobre todo, al personal del Servicio de Extracciones. Gratamente agradecidos con Nuria Tirador, Carmen Peñalosa y María Antonia Fernández.*

*En este momento están en mi recuerdo las personas que me han animado y apoyado durante todo este tiempo. A ellos muchas gracias.*



# Resumen

Hoy en día el sector sanitario es uno de los más grandes y con mayor crecimiento del mundo. La innovación es constante y las políticas de gestión de pacientes están en el punto de mira. En los próximos años se incrementará notablemente la automatización de diversos procesos que requerirán de la estadística y de la informática para su óptimo desarrollo.

Este Trabajo de Fin de Grado se centra en la simulación de eventos discretos en el sector sanitario. La necesidad de estudiar con antelación qué aparece en la literatura, es clave para la gestión de los servicios hospitalarios. Estos modelos de simulación supusieron grandes avances en el sector industrial y ha sido recientemente cuando se han empezado a aplicar al sector sanitario.

Posteriormente, se presentará un nuevo caso de estudio desarrollado para el Hospital Universitario Río Hortega de Valladolid. Este caso de estudio consistirá en el desarrollo de la construcción de un gemelo digital mediante la simulación de eventos discretos del Servicio de Extracciones de este hospital.

El desarrollo del gemelo digital así como los gráficos se han realizado con el software FlexSim y R.

## Palabras clave

Simulación de eventos discretos, FlexSim, Optimización, Proceso hospitalario, Flujo de pacientes, Servicio de extracciones, R





# Abstract

Nowadays, healthcare sector is one of the largest and most promising in the world. Innovation is constant and patient management policies are the focus in the present. In the next few years, the automation of various processes will be increased significantly and will require of statisticians and computer engineers for their optimal development.

This bachelor's thesis focuses on discrete event simulation (DES) in the health sector. We are going to develop a systematic review to collect everything that appears in the literature about DES applied in the healthcare services. These simulation models made great advances in the industrial sector and recently they have begun to be applied to the health sector.

A new case study is develop, a digital twin of the Collection Service of the Hospital Universitario Río Hortega (Valladolid) is built applying DES.

FlexSim was used to build the digital twin and the R software to create the graphs.

## Keywords

Discrete event simulation (DES), FlexSim, Optimization, Health care, Patient flow, Blood collecting service, R



# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>17</b>
1.1. Contexto . . . . .	17
1.2. Motivación personal . . . . .	19
1.3. Objetivos . . . . .	19
1.4. Alcance . . . . .	20
1.5. Estructura de la memoria . . . . .	20
<b>2. Plan de proyecto</b>	<b>21</b>
2.1. Metodología . . . . .	21
2.2. Gestión de riesgos . . . . .	22
2.3. Plan de trabajo . . . . .	27
2.3.1. Recursos . . . . .	27
2.3.2. Tareas . . . . .	27
2.3.3. Calendario . . . . .	29
2.4. Estudio de costes . . . . .	29
2.4.1. Horas efectivas y tasas horarias del personal . . . . .	29
2.4.2. Amortizaciones del equipo informático . . . . .	31
2.4.3. Coste del material consumible . . . . .	31
2.4.4. Costes indirectos . . . . .	32
2.4.5. Tiempos asociados a cada fase del proyecto . . . . .	32
2.4.6. Costes asignados a las fases del proyecto . . . . .	33
2.4.7. Coste total del proyecto incluyendo al personal del Sacyl . . . . .	36
2.4.8. Coste total del proyecto no incluyendo al personal del Sacyl . . . . .	37

<b>3. Revisión sistemática de la literatura</b>	<b>39</b>
3.1. Metodología . . . . .	39
3.1.1. Localización de los conceptos clave . . . . .	40
3.1.2. Criterios de inclusión . . . . .	42
3.1.3. Estrategia de búsqueda . . . . .	43
3.2. Fuentes de información y estrategia de búsqueda . . . . .	48
3.3. Resultados . . . . .	48
3.4. Análisis de los casos de estudio . . . . .	54
3.4.1. Software utilizado . . . . .	54
3.4.2. Área de aplicación . . . . .	55
3.4.3. Resultados de los modelos . . . . .	58
3.4.4. Limitaciones del análisis . . . . .	58
<b>4. Simulación de eventos discretos</b>	<b>61</b>
4.1. Introducción . . . . .	61
4.2. Simulación de eventos discretos . . . . .	61
4.3. Metodología de la simulación . . . . .	63
<b>5. Caso de estudio</b>	<b>65</b>
5.1. Proceso de extracciones . . . . .	65
5.2. Objetivos . . . . .	68
5.3. Análisis de datos . . . . .	68
5.3.1. Anonimización de datos . . . . .	70
5.4. Modelo conceptual . . . . .	70
5.4.1. Flujograma paciente de extracción de sangre . . . . .	72
5.4.2. Flujograma paciente de muestras . . . . .	72
5.4.3. Flujograma completo . . . . .	72
5.5. Programación del flujograma . . . . .	78
5.5.1. Espera kiosko . . . . .	78
5.5.2. Espera recepción . . . . .	78
5.5.3. Paciente de Tipo 1 - Extracciones . . . . .	80

5.5.4. Paciente de Tipo 2 - Extracciones pediátricas . . . . .	82
5.5.5. Paciente de Tipo 3 - Muestras . . . . .	82
5.5.6. Abandono del Servicio de Extracciones . . . . .	82
<b>6. Construcción del modelo en FlexSim</b>	<b>85</b>
6.1. Construcción del 3D . . . . .	85
6.2. Piscinas de recursos . . . . .	89
6.3. Tipos de pacientes . . . . .	89
6.4. Creación de individuos . . . . .	90
6.5. Vías clínicas . . . . .	90
6.6. Estadísticas . . . . .	92
6.7. Experimentador (OptQuest) . . . . .	97
<b>7. Conclusiones</b>	<b>99</b>
7.1. Trabajo realizado . . . . .	99
7.2. Algunas reflexiones consideradas importantes . . . . .	100
7.3. Trabajo futuro . . . . .	100
7.4. Competencias . . . . .	101
7.4.1. Competencias básicas . . . . .	101
7.4.2. Competencias específicas . . . . .	101
7.4.3. Competencias transversales . . . . .	102
7.5. Reflexión final . . . . .	102
<b>Referencias</b>	<b>103</b>
<b>Apéndices</b>	<b>109</b>
<b>Apéndice A. Repositorio</b>	<b>111</b>
<b>Apéndice B. Manual FlexSim</b>	<b>113</b>
B.1. Licencias . . . . .	113
B.2. Entorno HealthCare . . . . .	116
B.3. Construcción del modelo . . . . .	117

B.3.1.	Primeros pasos con FlexSim . . . . .	117
B.3.2.	Run Time . . . . .	118
B.3.3.	Añadir un plano al modelo . . . . .	118
B.3.4.	Levantamiento del 3D . . . . .	120
B.3.5.	A* Navigation . . . . .	122
B.3.6.	Recursos . . . . .	124
B.3.7.	Creación de piscinas de recursos / grupos . . . . .	125
B.4.	Lógica del modelo . . . . .	127
B.4.1.	Diagrama de flujo de pacientes . . . . .	127
B.4.2.	Flujos de pacientes (llegadas/arrivals) . . . . .	129
B.4.3.	Otros recursos . . . . .	130
B.5.	Estadísticas / dashboards . . . . .	130
B.5.1.	Zonas/Zone . . . . .	130
B.5.2.	Dashboards – interfaz de estadísticas . . . . .	134

**Apéndice C. Referencias de la Revisión Sistemática de la Literatura** **141**

# Lista de Figuras

1.1. Evolución del número de pacientes en lista de espera . . . . .	18
1.2. Evolución de la demora . . . . .	18
2.1. Adaptación del modelo en cascada ( <i>Waterfall model</i> ) . . . . .	22
2.2. Diagrama de Gantt . . . . .	29
3.1. Operador de intersección AND . . . . .	41
3.2. Operador de unión OR . . . . .	41
3.3. Operador de exclusión NOT . . . . .	41
3.4. Evolución del número de metaanálisis publicados en PubMed . . . . .	44
3.5. Evolución del número revisiones sistemáticas de la literatura publicadas en PubMed	45
3.6. Diagrama de flujo PRISMA de la información a través de las diferentes fases de una revisión sistemática de la literatura . . . . .	47
3.7. Top 10 países con mayores publicaciones . . . . .	49
3.8. Publicaciones acumuladas por tipo de artículo (N = 492) . . . . .	51
3.9. Red de coocurrencia entre las palabras del título y abstract de los 492 artículos analizados . . . . .	53
3.10. Densidad de la coocurrencia entre las palabras del título y abstract de los 492 artículos analizados . . . . .	54
3.11. Software utilizado para la simulación de eventos discretos . . . . .	55
3.12. Distribución de los servicios médicos en los estudios analizados . . . . .	57
3.13. Resultados obtenidos con la simulación . . . . .	59
5.1. Evolución del número de citas en el servicio de extracciones comprendidas en el periodo entre febrero de 2019 y febrero de 2020 . . . . .	67

5.2. Plano de planta del servicio de extracciones . . . . .	67
5.3. Flujograma del paciente en el servicio de extracciones con esperas . . . . .	73
5.4. Flujograma completo en FlexSim . . . . .	75
5.5. Flujograma en FlexSim - Parte I . . . . .	76
5.6. Flujograma en FlexSim - Parte II . . . . .	77
5.7. Flujograma en FlexSim - Parte común . . . . .	79
5.8. Flujograma en FlexSim - extracciones (Tipo 1) . . . . .	81
5.9. Flujograma en FlexSim - extracciones (Tipo 2) . . . . .	83
5.10. Flujograma en FlexSim - Muestras (Tipo 3) . . . . .	84
5.11. Flujograma en FlexSim - Abandono del Servicio de Extracciones . . . . .	84
6.1. Plano del Servicio de Extracciones en 3D (puertas, paredes y ventanas) . . . . .	86
6.2. Plano de planta del Servicio de Extracciones en 3D (vista TOP) . . . . .	86
6.3. Plano del Servicio de Extracciones en 3D . . . . .	87
6.4. Plano del Servicio de Extracciones en 3D (vista TOP) . . . . .	88
6.5. Mapa de calor del plano de planta (inicio) . . . . .	91
6.6. Mapa de calor del plano de planta (media mañana) . . . . .	92
6.7. Dashboard personal . . . . .	93
6.8. Dashboard pacientes . . . . .	95
6.9. Diagrama de caja (BoxPlot) . . . . .	96
6.10. Experimenter (OptQuest) . . . . .	97
B.1. Ventana inicial FlexSim) . . . . .	113
B.2. Licencia FlexSim . . . . .	113
B.3. Instalar licencia FlexSim . . . . .	114
B.4. Devolver licencia FlexSim . . . . .	115
B.5. Actualizar licencia FlexSim . . . . .	115
B.6. Detalle instalación FlexSim . . . . .	116
B.7. Aviso FlexSim . . . . .	116
B.8. Actualización FlexSim . . . . .	116
B.9. Barra de herramientas FlexSim . . . . .	116



B.10.Entorno HealthCare FlexSim . . . . .	117
B.11.Nuevo modelo FlexSim . . . . .	118
B.12.Run Time . . . . .	118
B.13.Añadir un plano al modelo . . . . .	119
B.14.Visual paredes . . . . .	120
B.15.Propiedades de paredes . . . . .	120
B.16.Visualización del plano en el modelo . . . . .	121
B.17.Visualización del plano en el modelo (vista TOP) . . . . .	121
B.18.A* Navigation - panel de opciones . . . . .	122
B.19.A* Navigation . . . . .	123
B.20.A* Navigator properties . . . . .	123
B.21.Recursos de tipo localización (Location) . . . . .	124
B.22.Recursos de tipo personal (Staff) . . . . .	125
B.23.Recursos Multilocation . . . . .	125
B.24.Añadir grupos . . . . .	126
B.25.Toolbox . . . . .	126
B.26.Propiedades de los grupos . . . . .	127
B.27.Patient Flows . . . . .	127
B.28.HC Activity Sets . . . . .	128
B.29.HC Resources . . . . .	128
B.30.Properties . . . . .	129
B.31.Añadir un Process Flow . . . . .	129
B.32.Library . . . . .	130
B.33.Otros recursos . . . . .	130
B.34.Flujograma zona . . . . .	131
B.35.Propiedades zona . . . . .	131
B.36.Enter Zone . . . . .	132
B.37.Wait for Event . . . . .	132
B.38.Exit Zone . . . . .	133

B.39.Añadir estadísticas a dashboard . . . . .	133
B.40.Pin estadísticas . . . . .	134
B.41.Añadir un dashboard . . . . .	135
B.42.Parameters Table . . . . .	135
B.43.Model Input . . . . .	136
B.44.Tipos de gráficas . . . . .	136
B.45.Estadísticas people . . . . .	137
B.46.Varias estadísticas . . . . .	137
B.47.Estadísticas Staff . . . . .	138
B.48.Ejemplo dashboard staff . . . . .	138
B.49.Opciones del dashboard . . . . .	139
B.50.Propiedades del dashboard . . . . .	139

# Lista de Tablas

- 2.1. Riesgo 01 - Pérdida de datos . . . . . 23
- 2.2. Riesgo 02 - Recursos computacionales insuficientes . . . . . 23
- 2.3. Riesgo 03 - Avería del ordenador . . . . . 24
- 2.4. Riesgo 04 - Pérdida de licencias . . . . . 24
- 2.5. Riesgo 05 - Pérdida de acceso a internet . . . . . 24
- 2.6. Riesgo 06 - Enfermedad . . . . . 25
- 2.7. Riesgo 07 - Complejidad elevada de las tareas . . . . . 25
- 2.8. Riesgo 08 - Retrasos excesivos en la planificación . . . . . 25
- 2.9. Riesgo 09 - Insuficientes artículos relacionados con el tema de estudio en la revisión sistemática . . . . . 26
- 2.10. Riesgo 10 - Insuficientes datos para la elaboración del gemelo digital . . . . . 26
- 2.11. Matriz de impacto-probabilidad de riesgos antes de aplicar acciones de reducción y/o mitigación . . . . . 27
- 2.12. Matriz de impacto-probabilidad de riesgos después de aplicar acciones de reducción y/o mitigación . . . . . 27
- 2.13. Lista de tareas . . . . . 28
- 2.14. Cálculo de tiempos hábiles en el proyecto . . . . . 30
- 2.15. Remuneración personal . . . . . 30
- 2.16. Cálculo del coste y amortización del equipo informático . . . . . 31
- 2.17. Cálculo del coste del material consumible . . . . . 32
- 2.18. Cálculo de costes indirectos . . . . . 32
- 2.19. Cálculo de las horas dedicadas por el personal . . . . . 32
- 2.20. Cálculo del coste asociado a la fase 1 . . . . . 33

2.21. Cálculo del coste asociado a la fase 2 . . . . .	34
2.22. Cálculo del coste asociado a la fase 4 . . . . .	34
2.23. Cálculo del coste asociado a la fase 5 . . . . .	35
2.24. Cálculo del coste asociado a la fase 6 . . . . .	35
2.25. Cálculo del coste y tiempo total del proyecto con personal del Sacyl . . . . .	36
2.26. Cálculo del coste y tiempo total del proyecto sin personal del Sacyl . . . . .	37
3.1. Estrategia de búsqueda en las bases de datos . . . . .	48
3.2. Distribución de las publicaciones por países . . . . .	50
3.3. Distribución de las publicaciones por tipos . . . . .	51
3.4. Distribución del software utilizado . . . . .	56

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Contexto

El sector sanitario es uno de los más grandes y con mayor crecimiento del mundo [1]. Llevar a cabo una política de gestión de pacientes no es sencillo, más aún cuando un hospital se enfrenta a la variabilidad de los recursos disponibles en cada momento así como a mantener un equilibrio entre la demanda y la capacidad.

En la *Figura 1.1* se analiza la evolución del número de pacientes en lista de espera estructural en el Sistema Nacional de Salud (SNS) a nivel nacional desde el año 2006 así como el tiempo medio de espera en la *Figura 1.2*. Los datos se han obtenido en [2]. Se observa un elevado incremento de las listas de espera desde el año 2010 y del tiempo medio de espera en los dos últimos años.

La primera parte de este trabajo de investigación consiste en la realización de una revisión sistemática de la literatura (RSL) sobre los eventos discretos aplicados en el sector sanitario, los datos se obtuvieron de las bases de datos PubMed, Scopus y WOS ya que la mayoría de los artículos relevantes en nuestro área de investigación se encuentran disponibles en ellas. Para poder realizar esta revisión de la literatura se han seguido una serie de pasos que son importantes para conseguir que la revisión sea eficiente y esté completa.

La segunda fase de este trabajo está enfocada a realizar un gemelo digital del Servicio de Extracciones perteneciente al Hospital Universitario Río Hortega (HURH) [3] a través de técnicas de simulación de eventos discretos. Realizar cambios en el ámbito sanitario sin antes haber hecho algún estudio que demuestre su mejora hace que el paciente sea el principal perjudicado. En esta fase se cuenta con datos reales de dicho servicio.

Para poder llevar a cabo este TFG, se han necesitado varios meses en los que se ha tenido que aprender a manejar el software de simulación de eventos discretos FlexSim [4], que hace uso del lenguaje de programación C++. Se ha acudido al hospital para realizar un estudio del servicio hospitalario con el fin de que el gemelo digital fuera similar a la realidad del servicio.

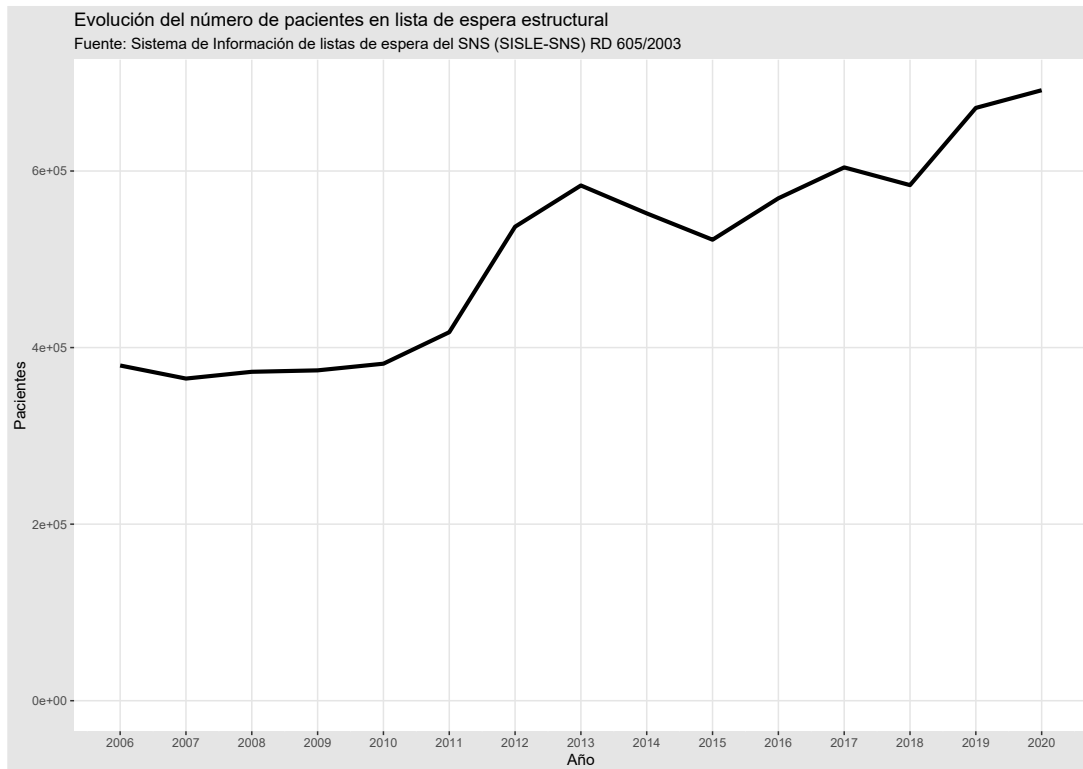


Figura 1.1: Evolución del número de pacientes en lista de espera

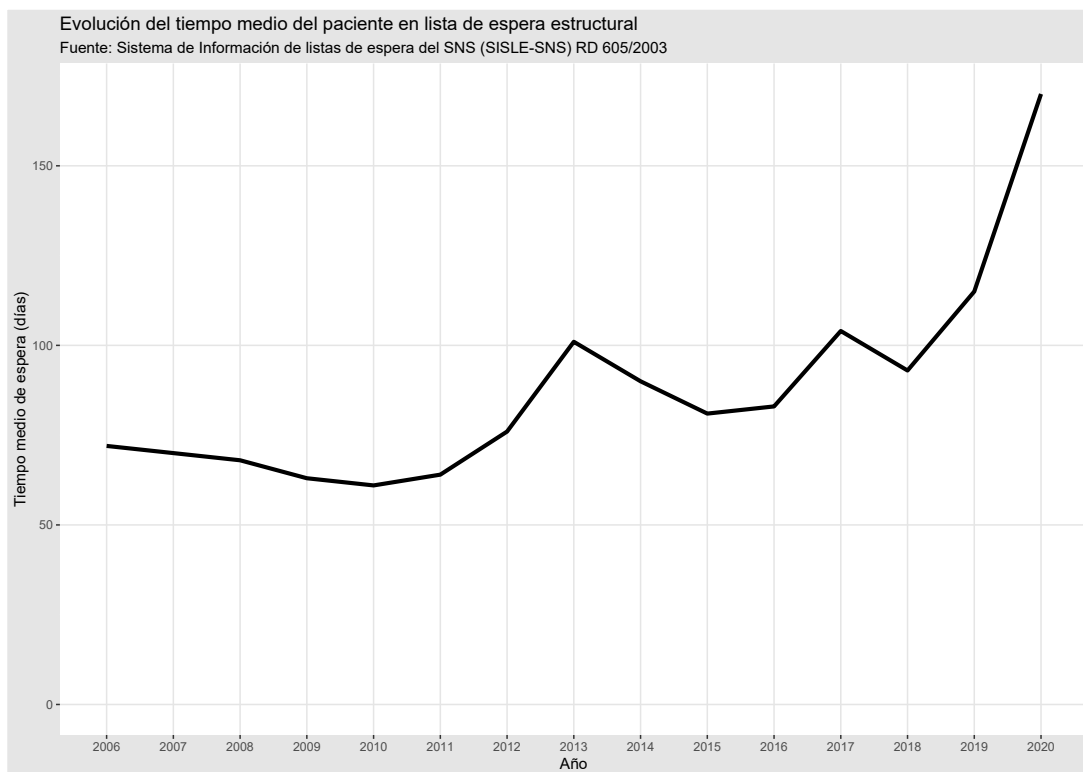


Figura 1.2: Evolución de la demora

El objetivo es analizar dicho proceso en la actualidad, estudiar la viabilidad y en el futuro diseñar varios escenarios de este servicio. En este TFG no se valida el modelo programado ni se diseñan varios escenarios. Habría que hacerlo para poder experimentar y obtener conclusiones válidas del servicio pero es una tarea que requiere de tiempo y está fuera del alcance en este proyecto.

Una vez que en el futuro se valide el modelo, la nueva información obtenida con los modelos de simulación nos permitirá gestionar y analizar datos sobre la gestión y optimización de forma que se demuestre que las predicciones de los modelos obtenidos que definen este proceso hospitalario tienen relevancia en la vida real como la mejora de costes, mejora de tiempos, etc.

## **1.2. Motivación personal**

Antes de empezar a estudiar el doble Grado en Ingeniería Informática y Estadística ya tenía un cierto interés por el sector sanitario. A medida que fui avanzando de cursos e investigando por mi cuenta fue cuando me di cuenta del potencial que tienen la informática y la estadística en el sector sanitario. A diario se almacenan cantidades ingentes de datos para su futuro uso, sin embargo, muchas veces se quedan almacenados pero no tratados. Uno de los objetivos del Big Data es transformar los datos para convertirlos en información útil que nos ayude a mejorar el sistema sanitario en beneficio de todos.

Al mismo tiempo que cursaba mis estudios, también realizaba voluntariado en Cruz Roja Española en el área de las Emergencias y la Logística, donde he tocado muchos puestos diferentes y he podido conocer como funcionaba en el resto de España, como en Madrid, Valladolid, Soria y Pamplona.

Realicé las prácticas de empresa en el Hospital Universitario Río Hortega con mi tutor D. Diego Vecillas Martín, quién me introdujo en el ámbito sanitario explicándome su funcionamiento, objetivos a tratar y las posibilidades de trabajar juntos en proyectos para optimizar la asistencia médica.

## **1.3. Objetivos**

A continuación, se exponen los objetivos de este Trabajo de Fin de Grado:

1. Realizar una revisión sistemática de la literatura sobre la aplicación de la simulación de eventos discretos al sector sanitario.
2. Entender los conceptos principales de un evento discreto y un gemelo digital.
3. Construcción de un gemelo digital del Servicio de Extracciones perteneciente al Hospital Universitario Río Hortega con datos reales.

## 1.4. Alcance

Este proyecto consta de varias partes, en primer lugar, la revisión sistemática tiene como objetivo conocer que aparece en la literatura sobre la simulación de eventos discretos en el sector sanitario. Esta revisión nos permitirá concluir el uso que se está dando a este tipo de modelado en el presente, la relevancia que conlleva y los servicios médicos en los que esté implicado.

A continuación, se deberán comprender los conceptos de los eventos discretos así como el comportamiento del personal del Servicio de Extracciones del HURH y de su flujo de pacientes. Este servicio será modelado mediante un gemelo digital con el software de simulación FlexSim.

## 1.5. Estructura de la memoria

Esta memoria sigue la estructura especificada en la guía docente para la asignatura TFG del Grado de Ingeniería Informática de la Universidad de Valladolid [5].

Siguiendo al presente capítulo de introducción, donde se expone el contexto, la motivación y los objetivos de este trabajo, se encuentran los siguientes capítulos:

- **Capítulo 2. Plan de proyecto:** en este capítulo se expone la metodología seguida en la realización del proyecto así como la planificación del mismo.
- **Capítulo 3. Revisión sistemática de la literatura:** en este capítulo se realiza un análisis y comparación de los documentos publicados sobre la simulación de eventos discretos en el sector sanitario en las bases de datos PubMed, Scopus y WOS.
- **Capítulo 4. Simulación de eventos discretos:** en este capítulo se describen los eventos discretos y la metodología de la simulación.
- **Capítulo 5. Caso de estudio:**<sup>1</sup> en este capítulo se describe con detalle el Servicio de Extracciones del HURH, los objetivos, análisis de datos, así como el modelo conceptual y su programación.
- **Capítulo 6. Construcción del modelo en FlexSim:** <sup>1</sup> en este capítulo se realiza la construcción del gemelo digital del Servicio de Extracciones en FlexSim.
- **Capítulo 7. Conclusiones y trabajo futuro:** en este capítulo se exponen las conclusiones obtenidas con la realización de este proyecto así como posibles formas de mejora o trabajo futuro.

Por último, se puede encontrar la bibliografía y los apéndices de este proyecto.

---

<sup>1</sup> Las estadísticas que aparecen no se corresponden con la realidad del servicio.



# Capítulo 2

## Plan de proyecto

### 2.1. Metodología

Este proyecto implica una carga de trabajo elevada. Supone, además, la construcción de un gemelo digital mediante simulación de eventos discretos para el proceso de las extracciones de laboratorio, por lo que al no resultar familiar en el campo de estudio del alumno, será inevitablemente necesario contar con ayuda hospitalaria y explorar diferentes documentos publicados sobre los eventos discretos en el sector sanitario.

Las metodologías tradicionales son adecuados para proyectos grandes en los que se parte de unos requisitos del sistema bien definidos como es este caso y se desea evitar volver a trabajar en tareas que ya se han dado por finalizadas. De esta manera, para este proyecto se ha decidido seguir una adaptación del clásico modelo en cascada propio de la Ingeniería del Software [6, 7]. La adaptación se puede ver en la *Figura 2.1* y nos sirve para llevar a cabo el desarrollo de la construcción de un gemelo digital del Servicio de Extracciones mediante la simulación de eventos discretos.

Este modelo impone al proyecto una estructura, consiste en una secuencia de actividades que va desde obtener los requisitos pudiendo hacer previamente un estudio de viabilidad hasta el despliegue. Una vez que la actividad esté completada, debe darse de paso y se avanza a la siguiente etapa. Es posible que una etapa posterior pueda revelar la necesidad de una modificación en una etapa anterior pero se debe tratar como una excepción ya que no es deseable volver atrás en el tiempo ya que se tienen unas fechas determinadas. Es indispensable validar el proyecto antes de poder experimentar con él, si bien, una vez validado la experimentación concluye que no es representativa de la realidad, se puede volver tantas fases atrás como sean necesarias para su correcto desarrollo.

Se realizarán reuniones periódicas con los tutores, D. Pablo Federico Sánchez Mayoral y D. Diego Vecillas Martín, para comprobar el progreso del proyecto y acordar las siguientes tareas a desarrollar.

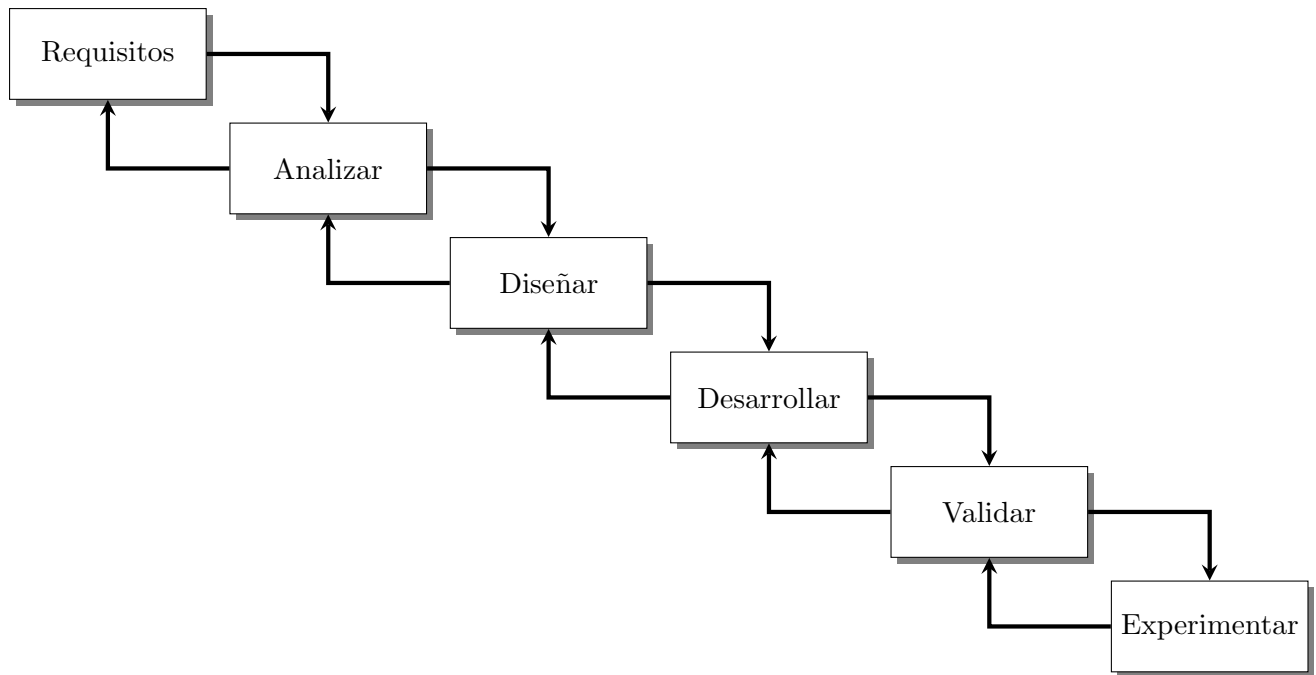


Figura 2.1: Adaptación del modelo en cascada (*Waterfall model*)

## 2.2. Gestión de riesgos

En esta sección se desarrolla todo lo relevante a la gestión de riesgos del proyecto. Un riesgo se puede definir como la probabilidad de exponerse a consecuencias adversas en eventos futuros o, un evento o una condición de incertidumbre que, si ocurre, tiene un efecto positivo o negativo en los objetivos del proyecto.

A continuación se desarrollan los principales riesgos detectados en este proyecto, indicando su exposición, y se proporcionan planes de protección y de contingencia (acción planificada que se lleva a cabo si el riesgo se materializa) para cada uno de ellos. Que el riesgo no ocurra no quiere decir que su coste sea cero, por ejemplo, llevar a cabo copias de seguridad periódicas tiene un precio pero puede llegar a compensar con el fin de que el riesgo no se materialice.

La exposición de un riesgo (*RE: Risk exposure*) se determina con la siguiente fórmula:  $RE = \text{impacto en el proyecto} \times \text{probabilidad de que el riesgo ocurra}$ .

Para medir tanto el impacto como la probabilidad de los riesgos se ha decidido utilizar descriptores cualitativos que tomen los siguientes valores:

- **Alto:** Más de un 50 % de probabilidades de que se produzca.
- **Significativo:** 30-50 % de probabilidades de que se produzca.
- **Moderado:** 10-29 % de probabilidades de que se produzca.
- **Bajo:** Menos de un 10 % de probabilidades de que se produzca.

Con este tipo de medición del riesgo no nos es posible realizar un cálculo de la exposición de cada riesgo pero sí nos es posible representar cada riesgo en una matriz de impacto-probabilidad.

Planificar los riesgos nos permite lidiar con:

- Aceptación del riesgo.
- Evitación del riesgo.
- Reducción del riesgo: reducir la probabilidad de que el riesgo ocurra.
- Transferencia del riesgo.
- Mitigación del riesgo o implementar medidas de contingencia: reducir el impacto cuando ocurra el riesgo (por ejemplo, haciendo copias regularmente).

A continuación, se enumeran los principales riesgos detectados, incluyendo una descripción, y el impacto y la probabilidad estimados, tanto antes como después de aplicar los planes de protección y contingencia.

<b>Ri01</b>	<b>Pérdida de datos</b>	
<b>Descripción</b>	Pérdida de código, documentos o algún otro tipo de dato relevante para la consecución del proyecto.	
<b>Plan de Protección</b>	Guardar frecuentemente la documentación y código programado.	
<b>Plan de Contingencia</b>	Recuperar todos los datos posibles, determinar el tiempo necesario en recuperar el trabajo perdido y rehacer la planificación.	
<b>Valores impacto-probabilidad</b>		
	Probabilidad	Impacto
Antes	Significativa	Alto
Después	Baja	Bajo

Tabla 2.1: Riesgo 01 - Pérdida de datos

<b>Ri02</b>	<b>Recursos computacionales insuficientes</b>	
<b>Descripción</b>	El ordenador personal con el que se trabaja no tiene la capacidad de procesamiento o memoria requeridos para realizar las diferentes tareas.	
<b>Plan de Protección</b>	Ninguno	
<b>Plan de Contingencia</b>	Solicitar una máquina virtual a la Escuela de Ingeniería Informática que cubra los requisitos de procesamiento y memoria.	
<b>Valores impacto-probabilidad</b>		
	Probabilidad	Impacto
Antes	Baja	Significativo
Después	Baja	Bajo

Tabla 2.2: Riesgo 02 - Recursos computacionales insuficientes

<b>Ri03</b>	<b>Avería del ordenador</b>	
<b>Descripción</b>	Avería software o hardware del ordenador personal con el que se realiza este proyecto.	
<b>Plan de Protección</b>	Guardar los datos en la nube para evitar la pérdida de estos al ordenador personal lo máximo posible.	
<b>Plan de Contingencia</b>	Trabajar con otro ordenador mientras sea posible para poder continuar con el proyecto mientras la avería se soluciona.	
<b>Valores impacto-probabilidad</b>		
	Probabilidad	Impacto
Antes	Significativa	Alto
Después	Moderada	Moderado

Tabla 2.3: Riesgo 03 - Avería del ordenador

<b>Ri04</b>	<b>Pérdida de licencias</b>	
<b>Descripción</b>	Pérdida de la licencia de alguno de los programas necesarios para la elaboración del proyecto.	
<b>Plan de Protección</b>	Revisar las fechas de las licencias.	
<b>Plan de Contingencia</b>	Solicitar una nueva licencia al hospital o a la universidad.	
<b>Valores impacto-probabilidad</b>		
	Probabilidad	Impacto
Antes	Alta	Moderado
Después	Alta	Bajo

Tabla 2.4: Riesgo 04 - Pérdida de licencias

<b>Ri05</b>	<b>Pérdida de acceso a internet</b>	
<b>Descripción</b>	Pérdida del acceso a internet debido a alguna avería en el servicio telefónico o corte de luz.	
<b>Plan de Protección</b>	Ninguno	
<b>Plan de Contingencia</b>	Utilizar los datos móviles durante el primer día. En el caso de que la avería continúe, valorar el traslado a una segunda residencia o, acudir a alguna biblioteca de la Universidad de Valladolid para obtener acceso a internet a través del servicio Eduroam.	
<b>Valores impacto-probabilidad</b>		
	Probabilidad	Impacto
Antes	Baja	Alto
Después	Baja	Bajo

Tabla 2.5: Riesgo 05 - Pérdida de acceso a internet

<b>Ri06</b>	<b>Enfermedad</b>	
<b>Descripción</b>	Enfermedad que incapacite temporalmente al autor del proyecto para continuar trabajando, con el consecuente retraso en la planificación.	
<b>Plan de Protección</b>	Ninguno	
<b>Plan de Contingencia</b>	Evaluar el tiempo perdido y ajustar la planificación en la medida de lo posible.	
<b>Valores impacto-probabilidad</b>		
	Probabilidad	Impacto
Antes	Baja	Significativo
Después	Baja	Moderado

Tabla 2.6: Riesgo 06 - Enfermedad

<b>Ri07</b>	<b>Complejidad elevada de las tareas</b>	
<b>Descripción</b>	La complejidad de una o varias de las tareas es elevada y requiere más tiempo del estimado para ser completadas.	
<b>Plan de Protección</b>	Ninguno	
<b>Plan de Contingencia</b>	Estimar el retraso en la planificación que supondría completar las tareas. Tratar de realizar una adaptación sencilla de las tareas en el caso de que el retraso no se pueda compensar de forma aceptable.	
<b>Valores impacto-probabilidad</b>		
	Probabilidad	Impacto
Antes	Significativa	Alto
Después	Significativa	Significativo

Tabla 2.7: Riesgo 07 - Complejidad elevada de las tareas

<b>Ri08</b>	<b>Retrasos excesivos en la planificación</b>	
<b>Descripción</b>	Los diferentes retrasos acumulados hacen imposible realizar todas las tareas planificadas en los plazos establecidos.	
<b>Plan de Protección</b>	Controlar el cumplimiento de los tiempos establecidos según va avanzando el proyecto.	
<b>Plan de Contingencia</b>	Aumentar la carga de trabajo diaria para tratar de reducir los retrasos. Priorizar las tareas que quedan por realizar y descartar las menos importantes.	
<b>Valores impacto-probabilidad</b>		
	Probabilidad	Impacto
Antes	Significativa	Alto
Después	Moderada	Significativo

Tabla 2.8: Riesgo 08 - Retrasos excesivos en la planificación

<b>Ri09</b>	<b>Insuficientes artículos en la revisión sistemática</b>	
<b>Descripción</b>	No se encuentran suficientes artículos que cumplan las características de inclusión especificadas.	
<b>Plan de Protección</b>	Verificar que la búsqueda de los artículos se ha realizado siguiendo el procedimiento adecuado.	
<b>Plan de Contingencia</b>	Considerar criterios de inclusión menos restrictivos. Así como considerar palabras clave menos específicas.	
<b>Valores impacto-probabilidad</b>		
	Probabilidad	Impacto
Antes	Significativa	Alto
Después	Moderada	Significativo

Tabla 2.9: Riesgo 09 - Insuficientes artículos relacionados con el tema de estudio en la revisión sistemática

<b>Ri10</b>	<b>Insuficientes datos para la elaboración del gemelo digital</b>	
<b>Descripción</b>	No se dispone de suficientes datos para la realización del gemelo digital.	
<b>Plan de Protección</b>	Comprobar que las expectativas del gemelo digital sean realistas.	
<b>Plan de Contingencia</b>	Reducir las características del gemelo digital.	
<b>Valores impacto-probabilidad</b>		
	Probabilidad	Impacto
Antes	Significativa	Alto
Después	Moderada	Significativo

Tabla 2.10: Riesgo 10 - Insuficientes datos para la elaboración del gemelo digital

En la *Tabla 2.11* se puede ver la distribución en la matriz de impacto-probabilidad de los riesgos identificados antes de aplicar algún plan de protección o contención.

En la *Tabla 2.12* se puede observar la nueva distribución de los riesgos en la matriz de impacto-probabilidad teniendo en cuenta los planes de protección y de contingencia. En este caso, ninguno de los riesgos se encuentra dentro de la zona no tolerable, esta es, la indicada en color rojo.

Impacto\Prob.	Bajo	Moderado	Significativo	Alto
Alto	Ri02, Ri04	Ri01, Ri09, Ri10	Ri07, Ri08	
Significativo	Ri03, Ri06			
Moderado				
Bajo	Ri05			

Tabla 2.11: Matriz de impacto-probabilidad de riesgos antes de aplicar acciones de reducción y/o mitigación

Impacto\Prob.	Bajo	Moderado	Significativo	Alto
Alto	Ri04			
Significativo	Ri07		Ri08, Ri10	
Moderado	Ri06, Ri09	Ri03		
Bajo	Ri01, Ri02, Ri05			

Tabla 2.12: Matriz de impacto-probabilidad de riesgos después de aplicar acciones de reducción y/o mitigación

## 2.3. Plan de trabajo

El TFG del Grado de Ingeniería Informática de la Universidad de Valladolid consiste en 12 créditos ETCS que equivalen a un total de 300 horas de trabajo.

### 2.3.1. Recursos

El equipo de trabajo para la realización de este proyecto estará formado exclusivamente por el alumno, quien deberá realizar todas las tareas especificadas. El alumno además contará con el apoyo de su tutor de la Universidad de Valladolid así como de su tutor del Hospital Universitario Río Hortega.

### 2.3.2. Tareas

En la *Tabla 2.13* se describen la cadena de actividades a realizar en el proyecto. Junto a la descripción de cada tarea se puede ver la estimación de la duración esperada inicial del esfuerzo a realizar en horas y el esfuerzo real realizado. En total, el proyecto ha supuesto **342 horas** de trabajo, 13 horas menos de las 355 horas planificadas.

ID	Descripción	Estimado	Real
-	Plan de proyecto	34 h	23 h 35 min
1	Metodología: elección y estudio de una metodología de trabajo.	8 h	3h

ID	Descripción	Estimado	Real
2	Gestión de riesgos: identificar los riesgos, analizar los riesgos y desarrollar planes de protección y contingencia para reducir su exposición.	4 h	2 h 15 min
3	Plan de trabajo: identificar las tareas a realizar, estimar su esfuerzo en horas y realizar una planificación temporal de las mismas.	15 h	12 h 20 min
4	Estudio económico.	7 h	6 h
-	Revisión sistemática de la literatura	146 h	152 h 50 min
5	Familiarización con las bases de datos.	6 h	4 h
6	Metodología.	10 h	8 h 20 min
7	Obtención y clasificación de los artículos.	100 h	105 h
8	Extracción de conclusiones.	30 h	35 h 30 min
-	Obtención de datos del Servicio de Extracciones	15 h	13 h 15 min
9	Limpieza y adaptación de la BBDD para evaluar el proceso de las extracciones.	8 h	7 h
10	Creación del diagrama de flujo	2 h	1 h 30 min
11	Redacción del proceso seguido.	5 h	4 h 45 min
-	Eventos discretos.	16 h	15 h 30 min
12	Recopilación de información sobre los gemelos digitales y su descripción.	8 h	8 h 15 min
13	Metodología	8 h	7 h 15 min
-	Caso de estudio	24 h	18 h 45 min
14	Servicio de Extracciones en el HURH	4 h	3 h 30 min
15	Modelo conceptual	4 h	3 h
16	Programación flujogramas en FlexSim	16 h	12 h 15 min
-	Construcción del modelo en FlexSim	90 h	89 h 55 min
17	Construcción del 3D	30 h	27 h 20 min
18	Piscinas de recursos	8 h	6 h
19	Programación de pacientes	40 h	45 h 20 min
20	Vías clínicas	10 h	9 h 15 min
21	Estadísticas y experimentador	3 h	2 h
-	Otros	30 h	28 h 10 min
22	Redacción del manual	15 h	14 h 10 min
23	Elaboración de la presentación de la defensa	15 h	14 h
<b>Total</b>		<b>355 h</b>	<b>342 h</b>

Tabla 2.13: Lista de tareas





Concepto	Valor
Día inicio período	22/02/2021
Día fin de período	07/07/2021
Período (días)	135
Sábados y Domingos	38
Días festivos Valladolid	5
Días de vacaciones	8
Días media baja médica	8
Días Cursos Formativos	9
Total días hábiles	67
Total horas efectivas	335
Total semanas hábiles	9,6

Tabla 2.14: Cálculo de tiempos hábiles en el proyecto

Los salarios de los profesionales se han establecido según los salarios según las retribuciones percibidas por el personal del Sacyl en 2021 [8].

A partir de los sueldos medios asociados a cada uno de ellos en un período de 5 meses y de las horas efectivas trabajadas, se calculan las tasas de cada empleado por hora y por semana en la *Tabla 2.15*.

En el proyecto se cuenta con un director del proyecto, un supervisor de enfermería responsable de verificar los modelos de simulación, un enfermero que debe enseñar el proceso del Servicio de Extracciones y resolver las dudas pertinentes, un auxiliar administrativo correspondiente al personal de recepción del Servicio de Extracciones cuya labor es explicar su trabajo y resolver dudas al ingeniero; de forma similar el TCAE. El ingeniero deberá, aprender el proceso, simularlo virtualmente y generar la documentación pertinente.

Concepto	Director	Enfermero (Supervisor)	Enfermero	Auxiliar administrativo	TCAE	Ingeniero informático
Sueldo bruto (€/mes)	4415.30	2376.98	2065.51	1338.66	1330.12	2704.69
Total anual	59 553.50	32 138.82	27 756.58	18 215.88	18 122.82	36 014.54
Seguridad Social (35%)	20 843.73	11 248.59	9714.8	6375.56	6342.99	12 605.09
Coste (€/hora)	34.62	18.69	15.85	10.59	10.54	20.94
Coste (€/semana)	1145.26	618.05	533.78	350.31	348.52	692.59
Coste total proyecto	20 576.5	11 884.9	10 327.55	6693.3	6650.6	13 523.45

Tabla 2.15: Remuneración personal

El coste horario se obtiene al dividir el total anual entre el número de horas efectivas reales de trabajo. A partir del 1 de enero de 2021 se establece una jornada anual de 1.720 horas efectivas reales de trabajo [9].

El coste total del proyecto ha sido calculado para el periodo de 5 meses de duración.

## 2.4.2. Amortizaciones del equipo informático

En la *Tabla 2.16* se detallan los costes asociados a los equipos informáticos, software y hardware. Se consideran un periodo de amortización de 5 años, con una cuota lineal y valor residual nulo; por lo que los costes totales se reparten de forma equitativa entre los 5 años del periodo correspondiente. En este proyecto, la amortización de los equipos es proporcional a los 5 meses de duración respecto al total de 1 año.

<b>Hardware</b>			
Concepto	Coste (€)	Cantidad	Coste total (€)
MacBook Pro de 16 pulgadas	3601.59	1	3601.59
Intel Core i9, 2.3 GHz, 64 GB RAM			
Monitor BenQ GW2280 21.5"	96	1	96
Soporte monitor	26.99	1	26.99
Teclado Razer Ornata Chroma	79.99	1	79.99
Adaptador Ofima USB C 8 en 1	49.99	1	49.99
Ratón ergonómico	12	1	12
Impresora HP OfficeJet 6950	99	1	99
<b>Software</b>			
Concepto	Coste (€)	Cantidad	Coste total (€)
FlexSim	16 500	1	16 500
Microsoft 365	69	1	69
R	0	1	0
Python	0	1	0
Overleaf	0	1	0
<b>Total a amortizar</b>			<b>20 534.56</b>
	Tipo	Periodo	Amortización (€)
	Anual	5 años	4106.91
	Semanal	394.9	78.89
	Diaria	11.25	2.25
	Horaria	7.03	1.4

Tabla 2.16: Cálculo del coste y amortización del equipo informático

## 2.4.3. Coste del material consumible

En este apartado se calcula el coste de los materiales consumibles por persona utilizados en el desarrollo del proyecto y hora de trabajo.

Concepto	Coste (€)
Papel impresora	75
Suministros impresora	210
Otros	40
Coste anual total por persona	325
Coste horario por persona	0.19

Tabla 2.17: Cálculo del coste del material consumible

#### 2.4.4. Costes indirectos

En la *Tabla 2.18* se detallan los costes indirectos del proyecto. Estos costes son los asociados a los consumos de servicios básicos tales como la electricidad, el teléfono, agua, etc. Se muestran las tasas de coste calculadas por trabajador en valor anual, horario y de duración del proyecto para cada uno de estos conceptos.

Concepto	Coste (€)
Teléfono e internet	115
Electricidad	50
Otros	300
Coste anual total por persona	465
Coste horario por persona	0.27
Coste proyecto por persona	193.755

Tabla 2.18: Cálculo de costes indirectos

#### 2.4.5. Tiempos asociados a cada fase del proyecto

En la *Tabla 2.19* se muestran los tiempos asociados a cada fase del proyecto por cada uno de los empleados descritos en la *Tabla 2.15*

Personal	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	Fase 6
Director	15	10	0	24	5	0
Enfermero (Supervisor)	0	0	0	0	1	0
Enfermero	0	0	0	0	5	0
Aux. Administrativo	0	0	0	0	2	0
TCAE	0	0	0	0	2	0
Ing. Informático	0	30	100	40	55	130

Tabla 2.19: Cálculo de las horas dedicadas por el personal

## 2.4.6. Costes asignados a las fases del proyecto

A continuación, se desglosa el gasto total del proyecto por cada fase. Se tienen en cuenta las horas que cada persona destina a cada parte del proyecto así como el salario y los costes estimados del material.

### 1. Necesidad encontrada

En la etapa inicial interviene el director cuya labor es encontrar la necesidad de la realización del proyecto para su justificación. Debe organizar los recursos y contar con la colaboración del servicio implicado que interviene en este proyecto.

El tiempo dedicado por empleado se detalla en la *Tabla 2.19*, los costes de esta fase en la *Tabla 2.20*.

Concepto	Horas	Coste (€/hora)	Coste total (€)
<b>Personal</b>			
Director	15	34.62	519.3
Enfermero (Supervisor)	0	18.69	0
Enfermero	0	15.85	0
Aux. Administrativo	0	10.59	0
TCAE	0	10.54	0
Ing. Informático	0	20.94	0
<b>Amortización</b>			
Equipo informático	25	1.4	35
<b>Material consumible</b>			
Varios	2	0.19	0.38
<b>Costes indirectos</b>			
Varios	16	0.27	4.32
<b>Coste total fase 1</b>			559

Tabla 2.20: Cálculo del coste asociado a la fase 1

### 2. Recopilación de información

La fase de recogida de información es necesaria tanto para el director como para el ingeniero informático. La comunicación entre ambos es esencial para que el proyecto se realice de forma satisfactoria y que se cumplan los objetivos resolviendo, el director, las dudas planteadas.

Concepto	Horas	Coste (€/hora)	Coste total (€)
<b>Personal</b>			
Director	10	34.62	346.2
Enfermero (Supervisor)	0	18.69	0
Enfermero	0	15.85	0
Aux. Administrativo	0	10.59	0
TCAE	0	10.54	0
Ing. Informático	30	20.94	628.2
<b>Amortización</b>			
Equipo informático	60	1.4	84
<b>Material consumible</b>			
Varios	8	0.19	1.52
<b>Costes indirectos</b>			
Varios	73	0.27	19.71
<b>Coste total fase 2</b>			1079.63

Tabla 2.21: Cálculo del coste asociado a la fase 2

### 3. Revisión sistemática

No se detalla el coste de una revisión sistemática, se trata de un trabajo académico impropio de una consultora empresarial.

### 4. Formación FlexSim

En esta fase tanto el director como el ingeniero informático reciben formación acerca del software que se va a desarrollar para la construcción del modelo.

Concepto	Horas	Coste (€/hora)	Coste total (€)
<b>Personal</b>			
Director	24	34.62	830.88
Enfermero (Supervisor)	0	18.69	0
Enfermero	0	15.85	0
Aux. Administrativo	0	10.59	0
TCAE	0	10.54	0
Ing. Informático	40	20.94	837.6
<b>Amortización</b>			
Equipo informático	72	1.4	100.8
<b>Material consumible</b>			
Varios	15	0.19	2.85
<b>Costes indirectos</b>			
Varios	70	0.27	18.9
<b>Coste total fase 4</b>			1791.07

Tabla 2.22: Cálculo del coste asociado a la fase 4

## 5. Desarrollo del modelo

La principal fase del presente proyecto, el desarrollo del modelo, requiere de la participación de todos los empleados considerados ya que estos serán los responsables de que el modelo se desarrolle de forma satisfactoria aportando todo su conocimiento sobre el servicio.

Es desarrollado enteramente por el ingeniero informático, que requiere la colaboración del resto de empleados de la organización para despejar dudas con el objeto de que el modelo se ajuste a la realidad.

Concepto	Horas	Coste (€/hora)	Coste total (€)
<b>Personal</b>			
Director	5	34.62	173.1
Enfermero (Supervisor)	1	18.69	18.69
Enfermero	5	15.85	79.25
Aux. Administrativo	2	10.59	21.18
TCAE	2	10.54	21.08
Ing. Informático	55	20.94	1151.7
<b>Amortización</b>			
Equipo informático	70	1.4	98
<b>Material consumible</b>			
Varios	15	0.19	0.95
<b>Costes indirectos</b>			
Varios	80	0.27	21.6
<b>Coste total fase 5</b>			1585.99

Tabla 2.23: Cálculo del coste asociado a la fase 5

## 6. Elaboración de la documentación

En esta etapa se desarrolla toda la documentación relativa al trabajo realizado. Una vez escrita, se enviará para su revisión y aprobación. Esta tarea es responsable del director.

Concepto	Horas	Coste (€/hora)	Coste total (€)
<b>Personal</b>			
Director	0	34.62	0
Enfermero (Supervisor)	0	18.69	0
Enfermero	0	15.85	0
Aux. Administrativo	0	10.59	0
TCAE	0	10.54	0
Ing. Informático	130	20.94	2722.2
<b>Amortización</b>			
Equipo informático	180	1.4	252
<b>Material consumible</b>			
Varios	50	0.19	9.5
<b>Costes indirectos</b>			
Varios	190	0.27	51.3
<b>Coste total fase 6</b>			3035

Tabla 2.24: Cálculo del coste asociado a la fase 6

### 2.4.7. Coste total del proyecto incluyendo al personal del Sacyl

En la *Tabla 2.25* se muestra el coste total del proyecto. Este coste consiste en la suma de los costes de cada una de las fases que componen el proyecto. Se detalla además el tiempo total requerido por el personal para su realización.<sup>1</sup>

Fase	Horas	Coste (€)
Fase 1	15	559
Fase 2	40	1079.63
Fase 4	64	1791.07
Fase 5	70	1585.99
Fase 6	130	3035
<b>Total</b>	<b>319</b>	<b>8050.69</b>

Tabla 2.25: Cálculo del coste y tiempo total del proyecto con personal del Sacyl

Se ha calculado el coste para 319 horas de trabajo que llevan las fases 1, 2, 4, 5 y 6. No se calcula el precio de la fase 3 (revisión sistemática) al resultar un trabajo académico impropio de la consultoría empresarial.

La mayor parte del tiempo del proyecto se requiere en la recopilación de la información, formación y desarrollo. Sin el correcto desarrollo de estas etapas, es improbable que el modelo adquiera una validez real.

El desarrollo de la documentación es elevada. La documentación debe ser lo suficientemente detallada como para que cualquier usuario que no conozca el ámbito de estudio del proyecto, sea capaz de entenderlo y seguirlo sin un elevado esfuerzo.

En la *Subsección 2.4.8* se calcula el coste sin contabilizar los empleados del Sacyl. No habrá mucha diferencia respecto al coste de incluirlos visto en la *Tabla 2.25* pero, en las siguientes tareas de validación y experimentación del modelo construido, previsiblemente conllevará un coste elevado debido a que es tarea esencial de dicho personal.

---

<sup>1</sup>A estos costes habría que aplicarlos el Margen Comercial y los Impuestos Indirectos (IVA, recargo de equivalencia, etc.) para calcular el precio a cobrar en un hipotético cliente.



### 2.4.8. Coste total del proyecto no incluyendo al personal del Sacyl

Dado que el personal del Sacyl forma parte de los costes asumidos por ellos, podemos obtener un presupuesto más realista. En este caso únicamente se contabilizan los puestos del director, ingeniero y auxiliar administrativo.

Los costes se muestran en la *Tabla 2.26* se muestra el coste total del proyecto.<sup>2</sup>

Fase	Horas	Coste (€)
Fase 1	15	559
Fase 2	40	1079.63
Fase 4	64	1791.07
Fase 5	62	1466.68
Fase 6	130	3035
<b>Total</b>	<b>311</b>	<b>7931.38</b>

Tabla 2.26: Cálculo del coste y tiempo total del proyecto sin personal del Sacyl

Se ha calculado el coste para 311 horas de trabajo que llevan las fases 1, 2, 4, 5 y 6. En este caso tampoco se calcula el precio de la fase 3 (revisión sistemática) al resultar un trabajo académico impropio de la consultoría empresarial.

---

<sup>2</sup>A estos costes habría que aplicarlos el Margen Comercial y los Impuestos Indirectos (IVA, recargo de equivalencia, etc.) para calcular el precio a cobrar en un hipotético cliente.



## Capítulo 3

# Revisión sistemática de la literatura

“Una revisión sistemática es una manera de evaluar e interpretar toda la investigación disponible, que sea relevante respecto de una interrogante de investigación particular, en un área temática o fenómeno de interés” [10]. Tradicionalmente las revisiones sistemáticas han sido ampliamente utilizadas en el campo de la medicina (*Cochrane reviews*) [11] pero no quedan únicamente restringidas a este campo, de hecho, en la Ingeniería Informática también se aplican las revisiones de la literatura (véase, por ejemplo, Kitchenham, 2004; Kitchenham y Charters, 2007; Kitchenham et al., 2009, 2011) [12–15].

### 3.1. Metodología

Las revisiones sistemáticas de la literatura nos ayudan a responder a necesidades concretas y es fase imprescindible en cualquier trabajo de investigación ya que nos sirve para centrar la investigación y a sustentarla tanto teórica como conceptualmente explorando publicaciones previas sobre la temática. Con este estudio preliminar podremos explicar claramente cual será la aportación de lo publicado al conocimiento existente en la actualidad.

Realizar este tipo de revisiones no garantiza encontrar toda la literatura relevante en el área de estudio, sin embargo, podemos encontrar ciertas ventajas en realizarla ya que puede mapear soluciones existentes antes de que el investigador intente abordar el área; ayuda a evitar el sesgo en los trabajos; publicar estas revisiones beneficia a toda la comunidad científica evitando que los investigadores dupliquen su esfuerzo en rehacerlas; también permite identificar lagunas de conocimiento y destacar áreas en las que se necesita llevar a cabo una investigación más exhaustiva.

Identificaremos todas las referencias disponibles sobre el tema de estudio, tanto positivas como negativas con el objetivo de reducir el sesgo, teniendo en cuenta las aportaciones más relevantes tanto del pasado como del presente. Al final de este capítulo habremos sido capaces de relacionar un número elevado de estudios de diferentes y de distintos servicios hospitalarios.

La revisión sistemática de la literatura se realizará sobre las principales bases de datos del ámbito sanitario (PubMed, Scopus y WOS) para identificar artículos más precisos al estar especializadas en nuestro tema de estudio. Las bases de datos bibliográficas del CSIC (ICYT, ISOC e IME) conllevan sesgos idiomáticos y culturales debido a que sólo publican estudios científicos publicados en español y realizados en España constituyendo un acervo documental con escasa visibilidad internacional [16].

Si una revisión sistemática se lleva a cabo a fondo, se cumplen las ventajas nombradas anteriormente y por tanto adquiere un valor científico.

### 3.1.1. Localización de los conceptos clave

Esta sección es fundamental para poder continuar con la revisión sistemática de la literatura, consiste en identificar aquellos conceptos o palabras (simples o compuestas) clave relacionadas con el tema objeto de estudio con el propósito de identificar las lagunas de conocimiento y las necesidades de realizar una investigación en un área concreta.

Un modo de proceder a identificar esas palabras clave puede ser localizar algún artículo similar al estudio que vamos a llevar a cabo y fijarnos en las palabras clave que se han utilizado, de este modo podremos ampliar mediante esas palabras, la búsqueda de artículos o publicaciones relacionadas.

Es recomendable utilizar sinónimos de las palabras clave ya que los artículos no consideran unas palabras específicas base o incluso se pueden traducir a otros idiomas como el inglés para ampliar el número de resultados. Asimismo, es importante considerar que existen muchas palabras que aluden al mismo concepto y son de la misma familia. Así por ejemplo entorno a la hospitalización podemos encontrarnos documentos en los que aparece el término *hospitalización*, *hospital*, *hospitalario*, *etc.* Para evitar perder artículos que están usando otra palabra de la misma familia, podemos truncarla considerando la raíz de la palabra y añadiendo un asterisco al final de la misma. En el ejemplo anterior sería: *hospital\**.

Con el fin de localizar un mayor número de publicaciones, podemos emplear operadores booleanos combinando las palabras clave de modo que conseguimos delimitar nuestra búsqueda. Contamos con tres tipos de operadores booleanos:

- **AND:** Intersección. Incluye todos los términos de la búsqueda, nos ayuda a reducir y a concretar.

Health AND Care muestra las publicaciones que contengan ambos términos *Health* y *Care*. Se muestra en la *Figura 3.1*.

- **OR:** Unión. Incluye al menos uno de los términos de la búsqueda, nos ayuda a ampliar.

Health OR Care muestra los artículos que contengan solo el término *Health*, solo la palabra *Care*, como aquellos que contengan tanto *Health* como *Care*. Se muestra en la *Figura 3.2*.

- **NOT:** Exclusión. Se excluyen términos de la búsqueda ayudándonos a eliminar publicaciones no deseadas.

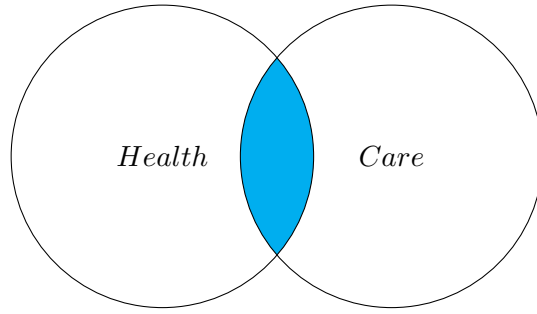


Figura 3.1: Operador de intersección AND

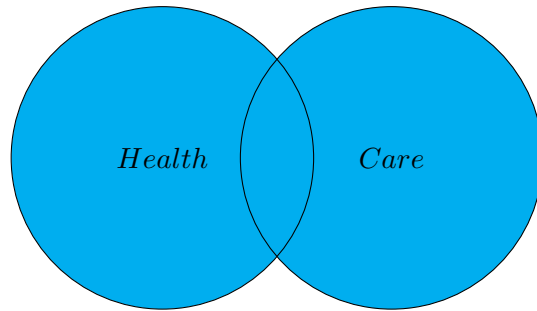


Figura 3.2: Operador de unión OR

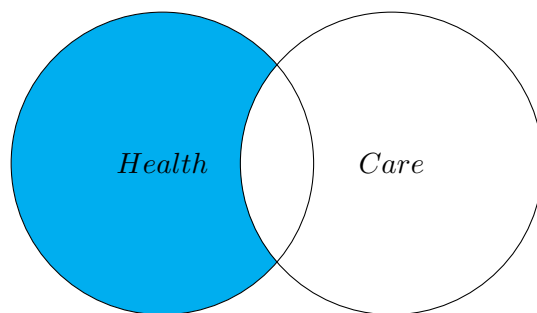


Figura 3.3: Operador de exclusión NOT

Health and NOT(Care) solo nos muestra las publicaciones que contienen la palabra *Health* sin la palabra *Care*. No es muy común usar este operador ya que puede excluir publicaciones relevantes. Se puede ver en la *Figura 3.3*.

Por defecto un espacio es tratado como AND, por ejemplo, si buscamos “listas de espera”, en inglés se traduciría como “*waiting lists*”, y la búsqueda se interpretaría como “*waiting AND lists*”. Para que se interprete como una frase, debemos de tener en cuenta que no todas las bases de datos siguen la misma convención. Así por ejemplo en PubMed y WOS, deberíamos entrecomillar las palabras: “*waiting lists*”.

Sin embargo, en Scopus si entrecomillamos las palabras, hace una búsqueda más amplia en la que se ignoran los símbolos y busca tanto en singular como en plural, así si buscamos “*heart attack*” lo que obtendremos todas las publicaciones que contengan *heart attack*, *heart attacks*, *heart-attack*, etc. Por el contrario, si usamos las llaves estaremos limitando la búsqueda a únicamente esas palabras obteniendo resultados diferentes para “*{heart attack}*” que para “*{heart-attack}*”.

En el caso de WOS, si separamos dos palabras por un guión *discrete-event* mostrará las publicaciones que contengan *discrete-event* o *discrete event*.

Los paréntesis nos sirven para anidar conceptos que deben ser tratados como una unidad en la búsqueda, cuando usamos el operador OR con varios términos, pondremos un paréntesis al inicio y otro al final, mientras que entre los diferentes conceptos los enlazaremos con AND.

### 3.1.2. Criterios de inclusión

Para garantizar la calidad de los artículos o publicaciones y focalizar más la búsqueda de nuestro tema de estudio, debemos delimitar los criterios de búsqueda mediante el uso de filtros consiguiendo de este modo limitar los resultados.

Se han incluido solo aquellos artículos que tengan **Abstract** o resumen y se encuentren escritos en el idioma **inglés** publicados entre el mes de enero del año 2010 hasta el mes de diciembre del año 2020 con el objetivo de considerar años completos, de este modo la **línea temporal** es de **10 años**. Asimismo al realizar la búsqueda nos encontramos con varios tipos de estudios, así pues según su tipología se clasificaron como:

- **Review o revisión:** Obtener información a partir de un análisis de artículos ya publicados en revistas, libros...
- **Theoretical-conceptual o teórico-conceptual:** Planteamiento teórico de ventajas, aplicabilidad... Refleja de forma teórica el comportamiento una serie de soluciones del problema mostrando las ventajas obtenidas.
- **Action research o investigación aplicada:** Planteamiento de un problema y resolución. Muy similar al teórico-conceptual pero esta vez se resuelve el problema.
- **Case study o caso de estudio:** Descripción de un caso completo.

- **Survey o encuesta:** Resumen de resultados de cuestionarios, llamadas, entrevistas...
- **Ethnographic research o estudio etnográfico:** Observación de los participantes en su entorno real. Consiste en observar para obtener valor recopilando información de los participantes en la realidad. No se hace nada con la información, simplemente se ordena.

Recopilamos todas las publicaciones relacionadas con nuestra temática de estudio de la simulación de eventos discretos obteniendo los siguientes datos de cada una de ellas:

- Título del artículo.
- Nombre de los autores.
- Institución / universidad / empresas de los autores.
- Países de los autores.
- Año de publicación.
- Nombre de la revista.
- DOI.
- Palabras clave (*keywords*).
- Tipo de artículo (descritos anteriormente),
- País de la experiencia.
- Personas afectadas (*hospital volume*).
- Artículos revisados.
- Nombre del archivo.

Además de esos campos, aquellas publicaciones consideradas **caso de estudio o case study** cuentan a mayores con el software utilizado, el proceso hospitalario en el que se ha aplicado y los resultados de la experiencia.

Se ha realizado una búsqueda idéntica en todas las bases de datos consideradas. En la *Sección 3.2* se detallan las consultas realizadas en las fuentes de información consideradas para la obtención de los artículos.

### 3.1.3. Estrategia de búsqueda

Como ya dijimos en el *Capítulo 1*, el sector sanitario es uno de los de mayor crecimiento mundial. En la actualidad existe un gran interés por la mejora de este sector, las publicaciones de los metaanálisis sanitarios siguen un crecimiento exponencial como podemos ver en la *Figura 3.4*, obtenida buscando en PubMed los artículos indexados (*publication type*) como metaanálisis. Se ha pasado de un único artículo publicado en el año 1992 a 15 734 en el año 2019. Es de suponer que el resto de bases de datos hayan tenido el mismo crecimiento. En el año 2020 se aprecia un atípico descenso hasta las 11 152 publicaciones muy posiblemente debido a la pandemia de COVID-19.

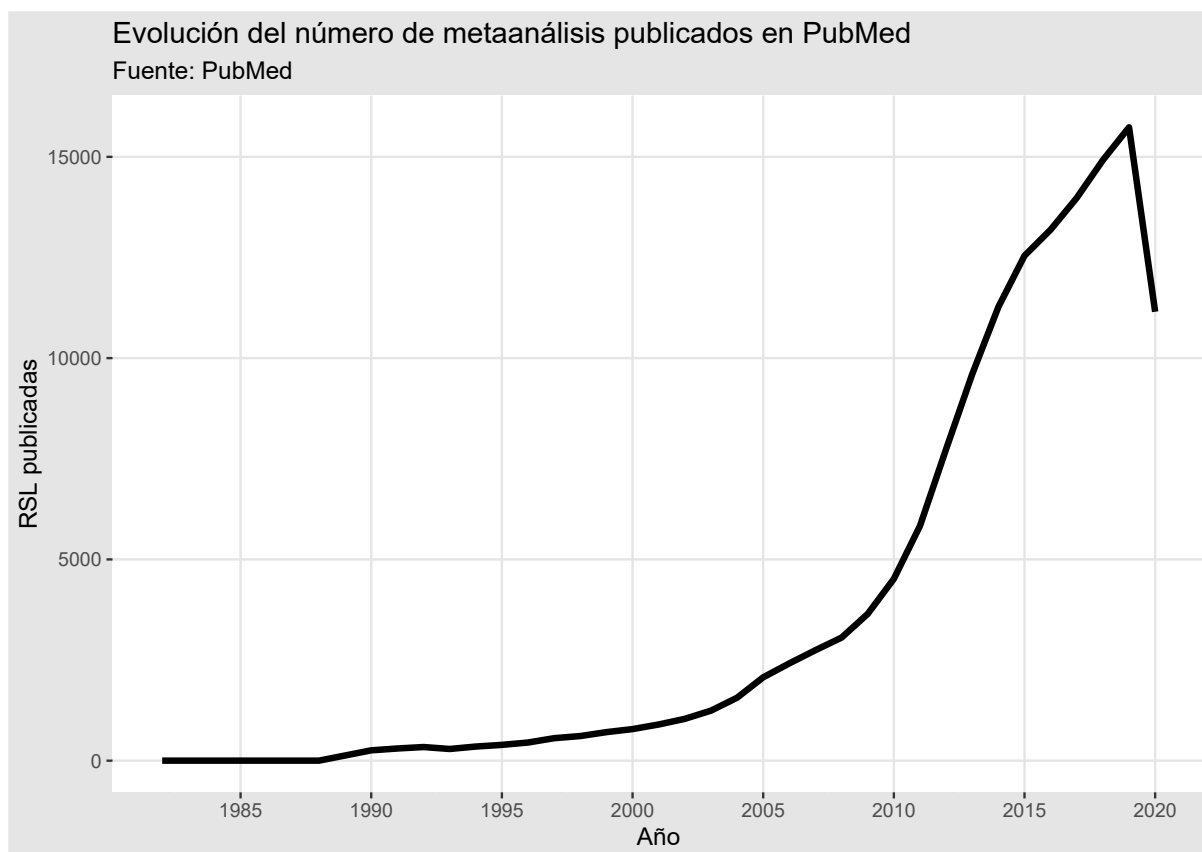


Figura 3.4: Evolución del número de metaanálisis publicados en PubMed

El volumen creciente de publicaciones científicas, la dispersión de las mismas, la calidad, las dificultades de acceso, la disponibilidad, barreras idiomáticas, la necesidad de estar actualizado y la falta de tiempo entre otras causas, justifican la necesidad de publicar documentos que resuman toda la información disponible de un mismo tema. Estos artículos son las llamadas revisiones sistemáticas de la literatura y tratan de cubrir esa necesidad para facilitar el acceso a través de un estudio a gran cantidad de información sintetizada al investigador. Es necesario que estas revisiones sean de calidad y sigan una serie de especificaciones para que la presentación de los resultados se expresen de forma clara y concisa para que lleguen a ser útiles, ya que estos artículos servirán para la toma de decisiones.

En el año 1999 se publicó la declaración QUOROM (*Quality Of Reporting Of Meta-analysis*) [17], consiste en un diagrama de flujo y una lista de comprobación (también llamada *checklist*) con 18 ítems que se debían tener en cuenta a la hora de publicar los metaanálisis de los ensayos clínicos en las revistas médicas. El objetivo era establecer unas normas haciendo énfasis en la síntesis estadística para mejorar la presentación de los resultados de los ensayos clínicos animando a los autores a proporcionar toda aquella información necesaria para interpretar y utilizar adecuadamente los resultados obtenidos.

Una RSL no es sinónimo de calidad, podemos encontrárnoslas buenas y mejorables. Se deben tener en cuenta las limitaciones a las que se hacen frente como la calidad de las publicaciones,



la información disponible, la valía del investigador, así como las discrepancias entre los ensayos clínicos [18].

QUOROM no logró una gran aceptación entre los investigadores a pesar de que el número de RSL que se publican anualmente es muy elevado como se puede ver en la *Figura 3.5*. Un estudio del 2010 estimó que a diario se publicaban once RSL [19] mientras que hoy en día estamos entorno a ochenta y siete.



Figura 3.5: Evolución del número revisiones sistemáticas de la literatura publicadas en PubMed

En 2009 nació la declaración PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses*) [20] (*Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses*) fruto de la evolución y ampliación de QUOROM, no limitándose únicamente a los meta-análisis sanitarios, sino que también es útil para cualquier otro tipo de estudio. PRISMA cuenta con 27 ítems [21] y un diagrama de flujo [22]. Esta declaración recibió un gran apoyo por parte de revistas biomédicas de alto impacto e instituciones de prestigio como (Cochrane). En 2013 la Revista Española de Salud Pública también adoptó PRISMA en sus normas de publicación [23].

A continuación, vamos a mostrar el diagrama de flujo PRISMA a nuestro proyecto, este diagrama describe el flujo de información a través de las diferentes fases que se llevan a cabo en la revisión sistemática de la literatura. Muestra el número de registros identificados, incluidos y excluidos, así como las razones de las exclusiones. (Para mejorar la comprensión, el uso y

la difusión de la declaración PRISMA se puede consultar la siguiente referencia, en la que se encontrará un documento con ejemplos y explicaciones en los que se presenta el significado y la justificación de cada elemento de la lista de verificación).

### PRISMA 2020 Diagrama de flujo

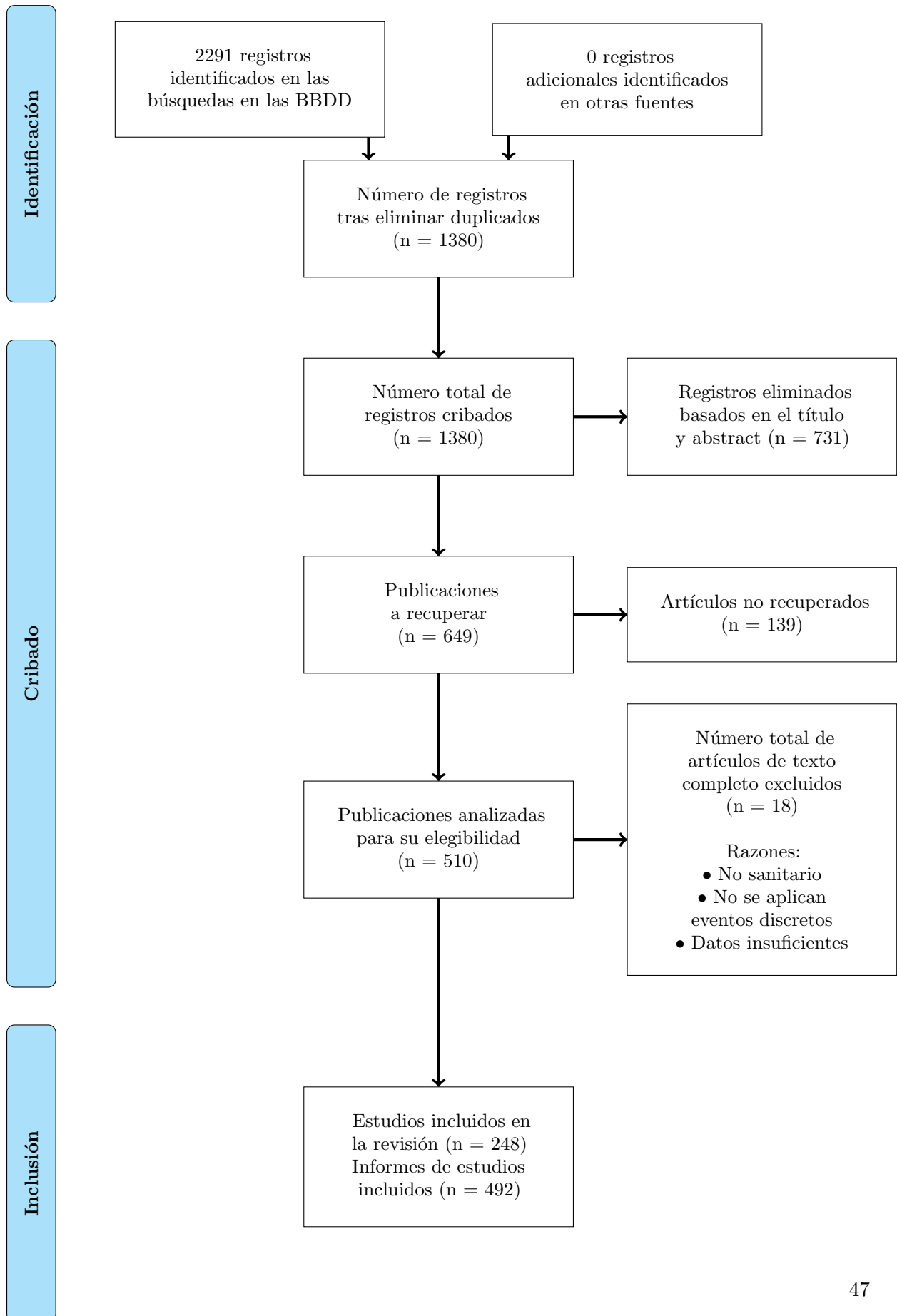


Figura 3.6: Diagrama de flujo PRISMA de la información a través de las diferentes fases de una revisión sistemática de la literatura

### 3.2. Fuentes de información y estrategia de búsqueda

En esta Sección se muestran los criterios de búsqueda de los artículos analizados.

BBDD	Fecha de búsqueda	Consultas	Publicaciones
PubMed	17 de marzo de 2021	“discrete-event simulation”[tiab] AND (“health care”[tiab] OR “hospital*”[tiab])	210
Scopus	17 de marzo de 2021	TITLE-ABS-KEY ((“discrete-event simulation”) AND (hospital* OR (“health care”))) AND PUBYEAR > 2009 AND PUBYEAR < 2021 AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, “English”))	997
WOS	17 de marzo de 2021	(discrete-event simulation) AND (hospital* OR “health care”)	1.084

Tabla 3.1: Estrategia de búsqueda en las bases de datos

### 3.3. Resultados

En este capítulo no se pretende dar una recomendación general sobre los modelos a utilizar, muchos documentos no sólo utilizan los eventos discretos sino que también hacen uso de la dinámica de sistemas (SD) y/o de la simulación basada en agentes (ABS). AnyLogic es el primer programa que contiene los tres. Sin embargo no ha sido el propósito principal de este trabajo, como sí lo es en otras revisiones sistemáticas.

A lo largo de estas secciones se mostrarán las estadísticas <sup>1</sup> de los artículos.

La gran mayoría de los casos de estudio se centraron en una unidad hospitalaria mientras que en otros se pretendía realizar un modelo genérico para el hospital. Las opiniones de los diversos investigadores varían sobre la viabilidad de la reutilización de modelos ya implementados [24], pero es difícil imaginar que mil centros de atención primaria necesiten mil modelos de simulación diferentes. Se ha mencionado atención primaria pero es válido cualquier servicio médico.

La *Figura 3.6* se muestra el diagrama de flujo PRISMA con los registros identificados y las razones de su exclusión. Se identificaron 2291 registros de los cuales 210 pertenecían a PubMed, 997 a Scopus y 1084 a WOS. Después de eliminar 911 duplicados, se revisaron 1380 de los cuales se eliminaron 731 en base al título y *abstract*. De los 649 artículos que cumplían los criterios para estudiarlos más a fondo, 139 fueron eliminados tras no estar disponibles. Los 510 restantes fueron descargados y leídos, 18 fueron excluidos por no tratarse de un artículo sanitario, no se

<sup>1</sup>Solo se mostrarán una parte de las estadísticas de los artículos analizados porque los resultados formarán parte de una publicación de mayor impacto. No se detalla más porque es una investigación en curso de gran relevancia.

aplicaban los eventos discretos o los datos eran insuficientes. Finalmente nos hemos quedado con 492 artículos que cumplen los criterios de inclusión de los cuales 230 eran casos de estudio. En el *Apéndice C* se distinguen los casos de estudio con el resto de artículos.

Entre los 492 artículos analizados, 216 (42 %) se llevaron a cabo en Europa, 206 (40 %) en América del Norte, 6 (1 %) en América del Sur, 63 (12 %) en Asia, 22 (4 %) en Oceanía y 6 (1 %) en África. Es posible que la suma no coincida con los artículos totales. Esto se debe a que varias publicaciones fueron realizadas por varios autores en distintos países y se han contabilizado todos los países partícipes en las publicaciones.

En la *Figura 3.7* se muestran los 10 países con mayor número de publicaciones. En concordancia con el artículo [25], se aprecia una gran variedad de países aunque la mayoría de las publicaciones procedían de Estados Unidos y de Reino Unido.

En la *Tabla 3.2* se puede apreciar de forma más detallada las estadísticas de todos los países.

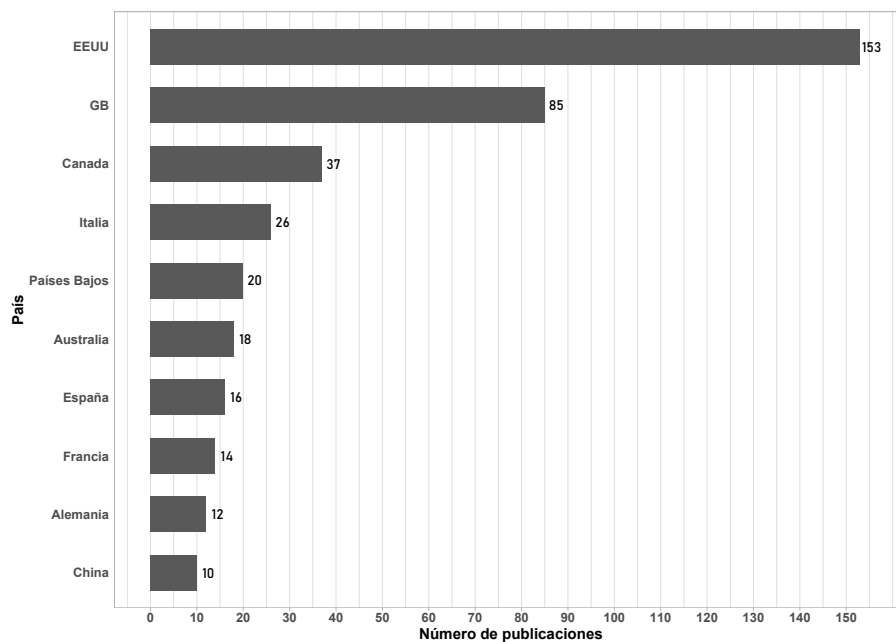


Figura 3.7: Top 10 países con mayores publicaciones

País	Número de artículos (%)
EEUU	153 (29.5)
GB	85 (16.4)
Canada	37 (7.1)
Italia	26 (5.0)
Países Bajos	20 (3.9)
Australia	18 (3.5)
España	16 (3.1)
Francia	14 (2.7)
Alemania	12 (2.3)
China	10 (1.9)
Brasil	9 (1.7)
Colombia	9 (1.7)
Suecia	9 (1.7)
Singapur	8 (1.5)
Turquía	7 (1.3)
Austria	5 (1.0)
Bélgica	5 (1.0)
Irán	5 (1.0)
Irlanda	5 (1.0)
Jordania	5 (1.0)
Emiratos Árabes Unidos	4 (0.8)
Hong Kong	4 (0.8)
India	4 (0.8)
Japón	4 (0.8)
Malasia	4 (0.8)
Nueva Zelanda	4 (0.8)
Noruega	4 (0.8)
Polonia	4 (0.8)
Rusia	3 (0.6)
Egipto	2 (0.4)
Grecia	2 (0.4)
Suiza	2 (0.4)
Taiwán	2 (0.4)
Camerún	1 (0.2)
Chile	1 (0.2)
Costa Rica	1 (0.2)
Dinamarca	1 (0.2)
Finlandia	1 (0.2)
Indonesia	1 (0.2)
Líbano	1 (0.2)
México	1 (0.2)
Marruecos	1 (0.2)
Omán	1 (0.2)
Pakistán	1 (0.2)
Palestina	1 (0.2)
Portugal	1 (0.2)
Puerto Rico	1 (0.2)
Serbia	1 (0.2)
Sudáfrica	1 (0.2)
Corea del sur	1 (0.2)
Túnez	1 (0.2)

Tabla 3.2: Distribución de las publicaciones por países

En la *Figura 3.8* se puede apreciar que, en general, el número de publicaciones han ido aumentando en el tiempo de forma más o menos similar para los tipo caso de estudio, investigación aplicada, teórico-conceptual. Las revisiones sistemáticas también aumentan pero de forma más paulatina ya que estas abarcan un gran numero de artículos mientras que los libros y las encuestas (*survey*) parecen estancarse.

En la *Tabla 3.3* se pueden apreciar las estadísticas por tipo de publicaciones.

### Publicaciones acumuladas de la literatura sanitaria en la que se emplean eventos discretos por tipo de artículo

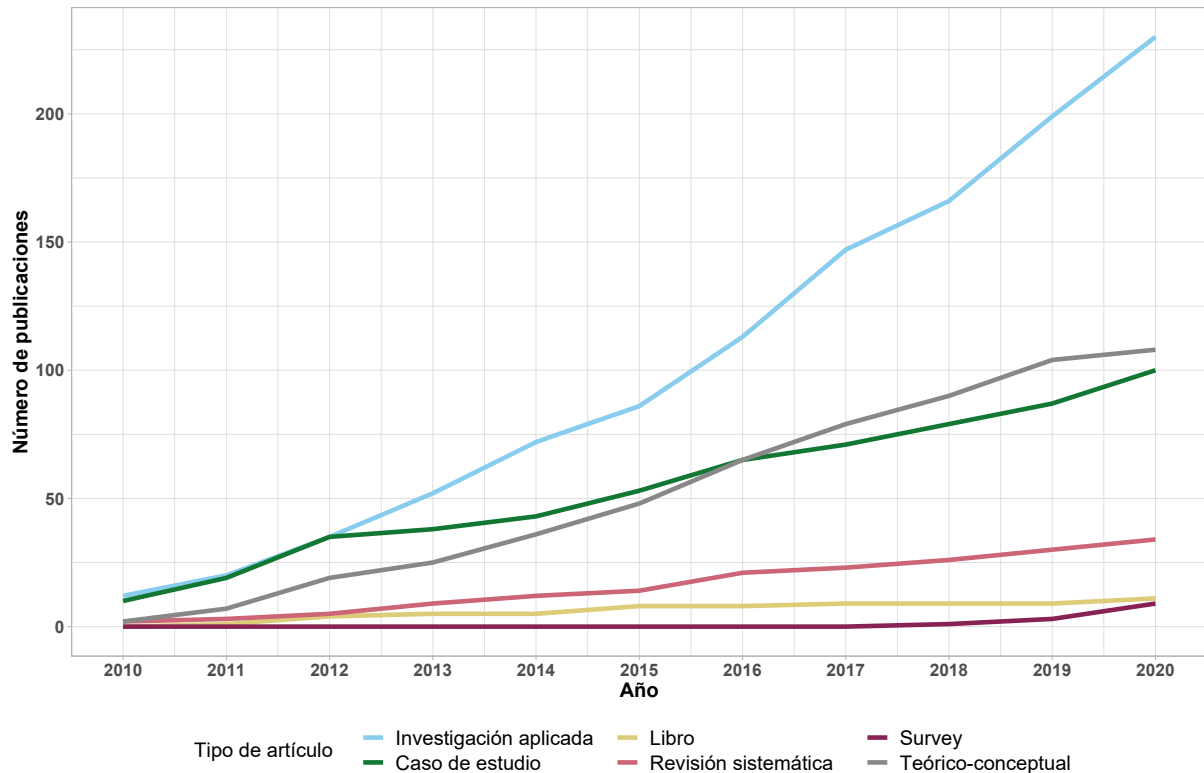


Figura 3.8: Publicaciones acumuladas por tipo de artículo (N = 492)

Tipo de publicación	Número de artículos (%)
Investigación aplicada	100 (29.5)
Caso de estudio	229 (16.4)
Libro	11 (7.1)
Revisión sistemática	33 (5.0)
Teórico-conceptual	110 (3.9)
Survey	9 (3.5)

Tabla 3.3: Distribución de las publicaciones por tipos

Se ha analizado la coocurrencia entre los títulos y los *abstract*. La coocurrencia nos permite detectar y agrupar aquellos conceptos que están íntimamente relacionados en un conjunto de publicaciones o registros. La idea básica es que podemos llegar a encontrar conceptos que

aparezcan juntos en varias publicaciones, esto muestra que existe una relación subyacente que posiblemente sea de gran relevancia. En nuestro caso analizar la coocurrencia nos puede servir para realimentar una nueva búsqueda sistemática. Se realizó una búsqueda con las consultas especificadas en la *Sección 3.2* y se puede refinar con nuevas palabras clave fruto de la coocurrencia. Esta estrategia es muy válida y puede generar buenos resultados cuando se evalúa sobre varios centenares de publicaciones.

Cuanto mayor es la frecuencia de aparición dos conceptos juntos en un conjunto de registros y menor es su aparición de forma separada en el resto de registros, mayor es la coocurrencia.

Por ejemplo, si muchas publicaciones contienen las palabras “coche” y “contaminación”, estos conceptos se pueden agrupar en una regla de coocurrencia, (coche & contaminación). En otro ejemplo, si los conceptos “jamón serrano”, “tomate” y “aceite” aparecen más a menudo agrupados que separados, se agruparán en una regla de coocurrencia de conceptos, (jamón serrano & tomate & bocadillo).

Las palabras “discrete event simulation”, “model”, “patient”, “health care” y “time” son las que más frecuentemente presentan un mayor grado de pares coocurrentes con 465, 349, 306, 240 y 235 ocurrencias respectivamente lo que nos sugiere que han recibido una cierta relevancia en la literatura. Si pretendemos refinar aún más la literatura debemos acudir a las palabras que contienen una gran relevancia y a través de sus pares concurrentes obtendremos las palabras más relevantes en base a esa especificación y podremos usarlas como palabras clave.

En el mapa de la *Figura 3.9* podemos ver la estructura de la red de coocurrencia y se muestran los clústers (núcleos) obtenidos en diferentes colores, en ellos aparece la palabra más relevante y las relacionadas. Ha sido desarrollado mediante VOSviewer [26] y se ha precisado de la realización de un fichero que contiene un diccionario de palabras similares para evitar que palabras como “health care” y “healthcare” figuren de forma separada cuando el significado es el mismo o; “des”, “discrete event simulation” y “discrete-event” entre otras.

El tamaño del nodo representa la frecuencia de las palabras, así pues “discrete event simulation” ocupa la posición central y es la de mayor tamaño. El grosor de la línea es proporcional a lo ligada que está la conexión entre las dos palabras, la distancia entre dos palabras en la visualización nos indica como de relacionadas se encuentran en términos de coocurrencia. Las palabras “health care”, “cost” y “study” están muy próximas a “discrete event simulation”.

VOSviewer presta más atención a un a similitudes indirectas por medio de una tercera palabra [27]. Por ejemplo en nuestro caso, la palabra “patient” coocurre con muchas otras palabras como “time”, “data”, “procedure”, “volume”, “reduction”, “rate”. Por lo tanto, la localización de una palabra depende del número de otras palabras con las que tengan una coocurrencia o similitud positiva. Cuanto más alta sea la similitud indirecta por medio de una tercera palabra, más cerca estarán esas palabras entre ellas. Puede darse el caso de que ciertas palabras que tenga una pequeña asociación en realidad sean útiles pero apenas aparecen debido a las restricciones de la editorial o revista sobre el número y la elección de palabras clave de los autores.



Se ofrece otra forma de visualización de las relaciones de las palabras en forma de mapa de calor en la *Figura 3.10*. Con esta gráfica se aprecia la densidad de una forma más sencilla, va desde el color azul, que representa una **baja densidad** pasando por el color verde, que representa una **densidad media** y por último el color rojo, que representa una **densidad alta**. Cuanto mayor sea el número de términos alrededor de un nodo y mayor sea la frecuencia de esos términos, el punto se aproximará al color rojo. Por el contrario, cuantos menos términos haya alrededor de un punto y menor sea la frecuencia de los términos, el punto tirará a un color azulado.

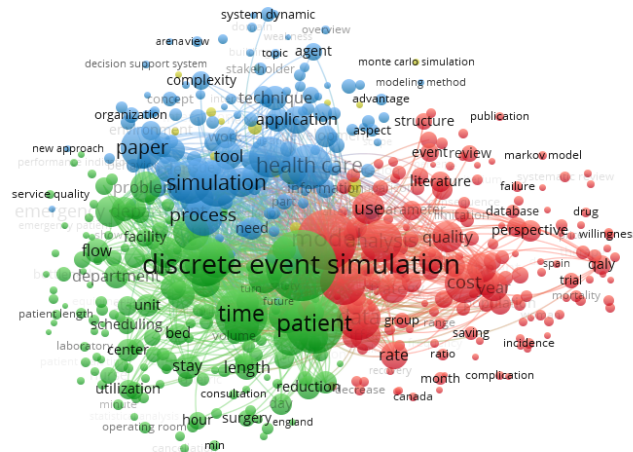


Figura 3.9: Red de coocurrencia entre las palabras del título y abstract de los 492 artículos analizados

Los mapas de densidad muestran las palabras más relevantes y la estructura de la red. Se aprecia como en las zonas amarillas hay menos palabras que en las zonas verdes lo que es un indicador de que hay un menor número de palabras básicas relevantes y muchas otras tienden a ser inmaduras o vagas. Se muestran muy bien en la *Figura 3.10* los cinco campos o palabras bien distintas de las que hablábamos en un principio: "discrete event simulation", "model", "patient", "health care" y "time".



Arena (la cual ocupa el primer lugar) y además posee una solución vertical (FlexSim Healthcare) especializada en el ámbito sanitario, sin embargo, es habitual encontrar con que las economías de red, las cuales son muy difíciles de detectar debido a que son dinámicas que no tienen mucho que ver con las cualidades tecnológicas sino que atienden más a razones históricas, se decanten por soluciones peores, posiblemente más obsoletas debido a la existencia de publicaciones previas en las que se usa, es decir, adoptan como consecuencia del ejemplo y la experiencia de los otros (imitan).

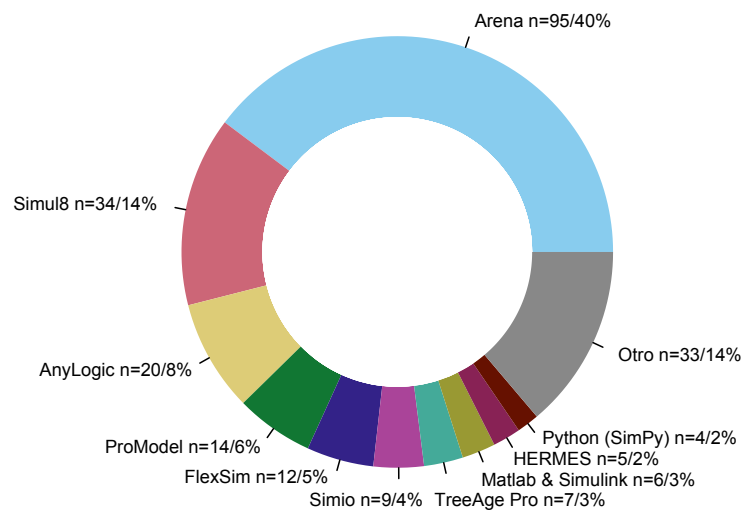


Figura 3.11: Software utilizado para la simulación de eventos discretos

### 3.4.2. Área de aplicación

La simulación de eventos discretos se puede aplicar en cualquier servicio médico que se pretenda optimizar en base a uno o varios propósitos previamente identificados. La simulación no se limita únicamente al campo de los pacientes sino que puede pasar tanto por el área de industrial del hospital como por el de lavandería.

En la *Figura 3.12* se aprecia como el servicio de urgencias y emergencias es el que reúne un mayor número de publicaciones, con un total de 67 (29%) seguido de hospital (optimización de varios servicios) que contiene 21 publicaciones (9%) así como oncología en el tercer puesto con 18 artículos (8%). Solamente un artículo optimizaba un servicio hospitalario que no tiene un trato directo con los pacientes.

Software	Número de veces utilizado (%)
Arena	95 (39.9)
Simul8	34 (14.3)
AnyLogic	20 (8.4)
ProModel	14 (5.9)
FlexSim	11 (4.6)
Simio	9 (3.8)
TreeAge Pro	7 (2.9)
MATLAB & Simulink	6 (2.5)
HERMES	5 (2.1)
Python (SimPy)	4 (1.7)
DEVSJAVA (SimView)	3 (1.3)
AutoMod	2 (0.8)
Excel	2 (0.8)
Vensim	2 (0.8)
Witness	2 (0.8)
BPMN4SIM	1 (0.4)
CPLEX	1 (0.4)
CPN Tools	1 (0.4)
Delphi	1 (0.4)
DESMO-J	1 (0.4)
ExtendSIM	1 (0.4)
ICU SIMULATOR	1 (0.4)
IMPRINT	1 (0.4)
Java Modeling Tools (JMT)	1 (0.4)
Little-JIL	1 (0.4)
No especificado	1 (0.4)
Patient Flow Simulator	1 (0.4)
ProHTA	1 (0.4)
Propio	1 (0.4)
R	1 (0.4)
ROMEIO	1 (0.4)
SAS	1 (0.4)
Scilab	1 (0.4)
SCIP	1 (0.4)
SIMEDIS	1 (0.4)
Tecnomatix Plant Simulation	1 (0.4)
VENSIM	1 (0.4)

Tabla 3.4: Distribución del software utilizado

Es necesario destacar que la literatura publicada está limitada (se hablará en la *Sección 3.4.4*) y no podemos hacernos a la idea de la realidad ya que es posible encontrarnos con hospitales que lleven a cabo una optimización de sus servicios mediante la metodología de simulación de eventos discretos y no se publique. Si bien, el servicio de urgencias/emergencias parece ser el más popular en la simulación y de gran relevancia en el día a día por lo que es necesaria la optimización de los recursos disponibles para poder hacer frente a la demanda la cual es completamente variable y en cierto punto impredecible.

El área de las urgencias y emergencias destaca por su relativa autonomía y tienen procesos fácilmente observables que generalmente cubren periodos de tiempo relativamente cortos de unas pocas horas, es una de las áreas más dinámicas y complejas de un hospital. También puede ser cierto que las mejoras en este tipo de servicios sean más fáciles de demostrar y de vincular a acciones específicas llevadas a cabo, lo cual puede no ser cierto en otro tipo de servicios médicos. Lo que está claro es que los modelos en este área de hospitalaria supera al resto de servicios y en la vida real está muy ligada a la Unidad de Cuidados Intensivos, que aunque no aparezca con una gran relevancia a la vista de la *Figura 3.12*, en realidad una optimización en el servicio de urgencias/emergencias en ciertos casos puede provocar una optimización indirecta del servicio de UCI (una atención temprana en urgencias puede llevar a un menor número de pacientes que precisen un ingreso en la UCI).

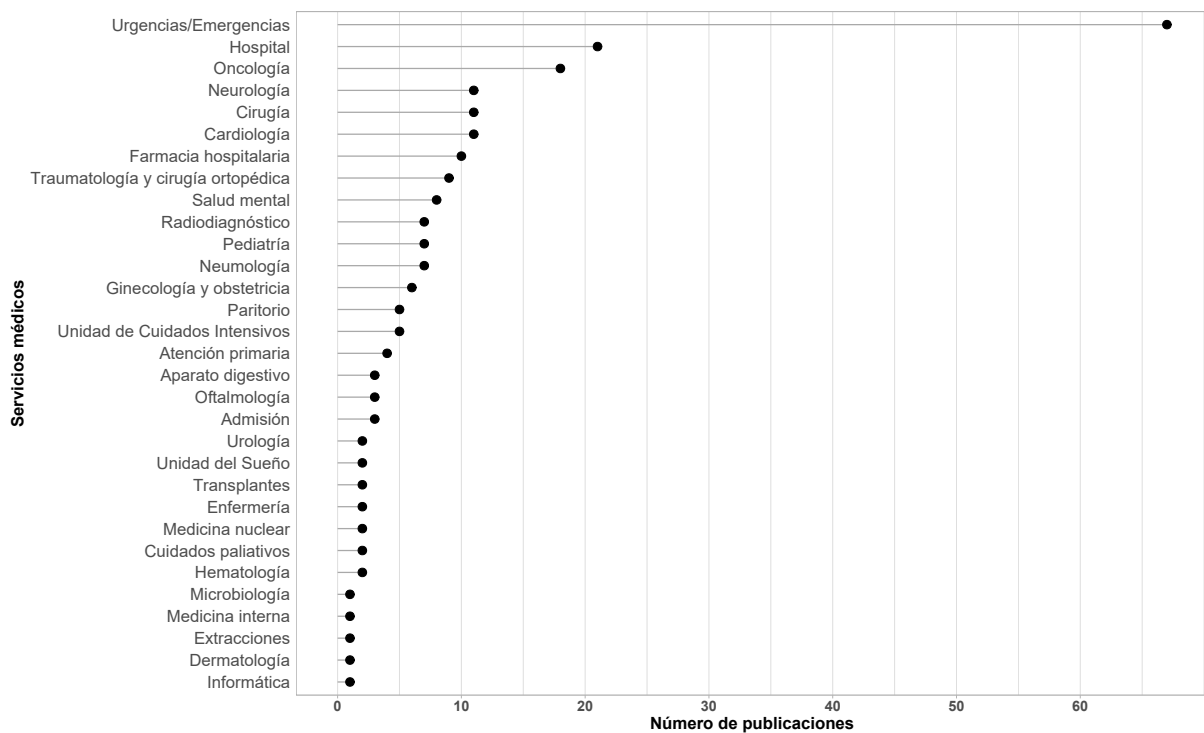


Figura 3.12: Distribución de los servicios médicos en los estudios analizados

### 3.4.3. Resultados de los modelos

El principal resultado obtenido de los modelos desarrollados en los casos de estudio ha sido una reducción del tiempo de espera del paciente con 70 (30 %) de las publicaciones seguido por una reducción de costos con 67 (29 %), aumento de la capacidad del servicio 45 (20 %), 30 (13 %) reducían la duración de la estancia en el hospital así como otras 29 (12 %) mejoraban la productividad del servicio hospitalario.

Es normal que la suma de los valores absolutos de la *Figura 3.13* sean mayores que el número de casos de estudio y los porcentajes mencionados en el párrafo anterior sean mayores que el cien por cien ya que en varias publicaciones se conseguían múltiples mejoras y se han contabilizado de forma individual siendo el número de mejoras superior a los 248 casos de estudio.

Destaca que en únicamente 6 publicaciones (3 %) se mencione que se consigue una mejoría de la satisfacción del paciente y solamente en una publicación se haga referencia a la mejora de la satisfacción del personal. Es evidente que si un paciente ve reducido su tiempo de espera, así como su tiempo de estancia en el hospital o la reducción de la infección, se produzca un aumento directo de su satisfacción por lo que presumiblemente no sea un campo que se haya evaluado mediante encuestas a pacientes o estudios observacionales. También cuando se ve incrementada la capacidad del servicio, se mejora la productividad, se reducen los errores médicos y se mejore el trabajo en equipo entre otros resultados, produzca una retroalimentación positiva sobre el personal hospitalario incrementando su satisfacción.

La reducción de costos además puede abrir nuevas líneas de investigación hospitalaria, mejora en las instalaciones, aumento del servicio médico, etc.

### 3.4.4. Limitaciones del análisis

La revisión que se ha llevado a cabo presenta ciertas limitaciones. A pesar de que se ha llevado a cabo una exhaustiva búsqueda sistemática, es posible que algunos estudios no fueran incluidos porque no han sido publicados (por ejemplo que hayan obtenido resultados negativos) o no estaban indexados en las bases de datos de nuestra búsqueda (la llamada literatura gris).

La Universidad Carlos III de Madrid define la literatura gris como:

Conjunto de documentos, de muy diversa tipología, que no son editados o que se publican pero distribuyen a través de canales poco convencionales (tesis doctorales, actas de congresos, informes de investigación, memorias, proyectos, patentes, normas, traducciones científicas, etc.), por lo que suelen plantear problemas especiales para conocerlos y localizarlos. [28]

Esto nos puede llevar a un sesgo de publicación ya que únicamente se han considerado aquellas publicaciones accesibles y disponibles a texto completo. También es importante destacar que se ha evaluado la calidad de las publicaciones, lo cual puede no reflejar la calidad del procedimiento

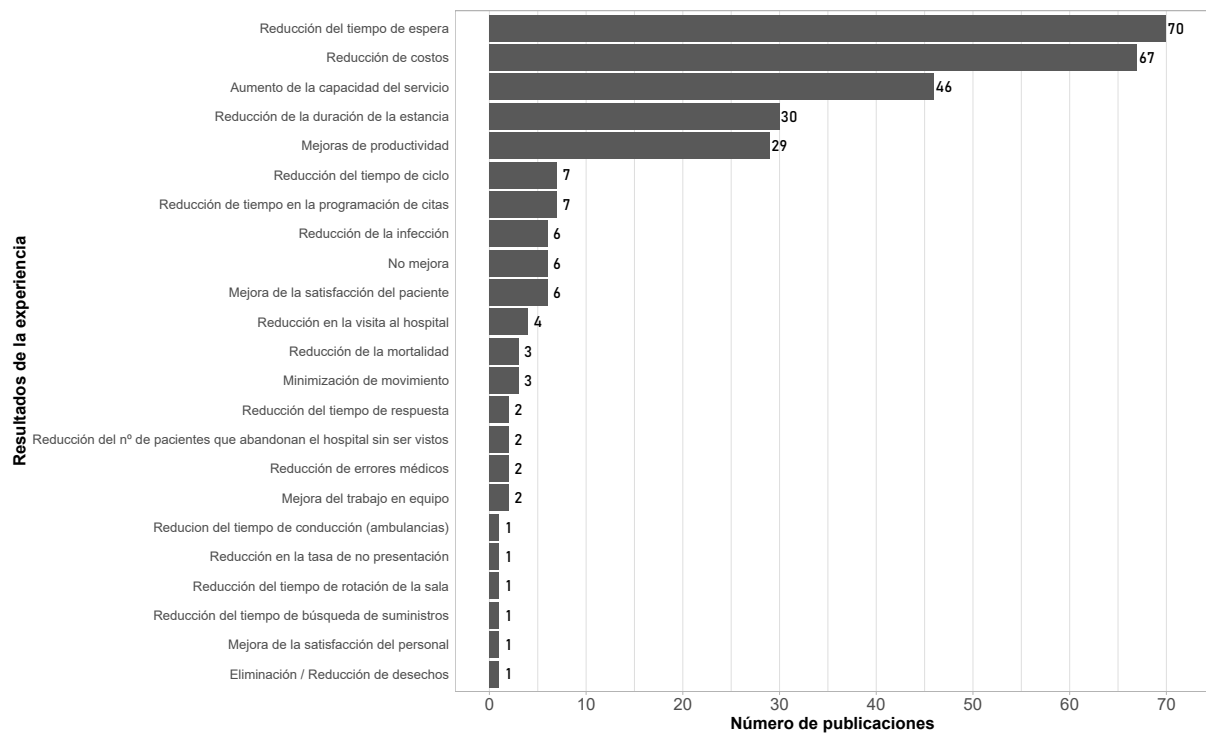


Figura 3.13: Resultados obtenidos con la simulación

empleado en ellas. En algunos casos podemos encontrarnos con que las restricciones de publicación de las revistas o editoriales limiten al autor o autores a describir completamente su trabajo pudiendo llevar a interpretaciones erróneas de los modelos descritos.





## Capítulo 4

# Simulación de eventos discretos

### 4.1. Introducción

Por múltiples razones, la simulación ha sido ampliamente difundida e implementada en el sector sanitario. A pesar de que la metodología dominante es la simulación de eventos discretos, numerosos proyectos han implementado la dinámica de sistemas, la simulación basada en agentes y métodos híbridos o combinados.

El software se ha ido adaptando incrementalmente al sector sanitario permitiendo unos mejores modelos, visualizaciones más realistas y herramientas de desarrollo más intuitivas. La simulación en este sector se ha implementado en servicios médicos muy diferentes como veíamos anteriormente en la *Figura 3.12*, incluso en otros servicios que afectan de forma directa o indirecta a estos como puede ser la cocina, lavandería, limpieza, etc. Los problemas frecuentes a los que se enfrenta el sector sanitario son a los flujos de pacientes, escasez de personal, horarios, falta de recursos, etc.

La reorganización en la cadena logística es crucial para los servicios médicos si se pretenden tener optimizados en el presente. El sistema sanitario es muy complejo debido a que las personas atienden las necesidades médicas de otras personas. Es muy importante que los servicios proyecten una imagen positiva, trabajen bien en equipo, así como cuidar otros aspectos para evitar que a otras partes del sistema aparentemente no relacionadas se filtren interacciones no deseadas.

### 4.2. Simulación de eventos discretos

En los últimos 50 años los hospitales han hecho frente al gran incremento de demandas para ofrecer tratamientos de calidad minimizando los costes e incrementando la satisfacción de los pacientes [29, 30].

La simulación de eventos **discretos** consiste en una técnica de simulación que sirve para analizar un proceso de un servicio para contestar preguntas o resolver problemas. Este tipo de

simulación es **dinámica**, se tiene en cuenta la progresión del sistema con el tiempo frente a los sistemas estáticos que son una foto fija.

Se usa para modelar sistemas que cambian de estado en instantes concretos como resultado de eventos específicos. Es una herramienta que permite modelar de forma **estocástica**, podemos tener en cuenta que no tenemos la certeza completa de lo que estamos observando y eso lo plasmamos en el modelo. Esto es muy útil para manejar diferentes niveles de abstracción con lo que estamos modelando, no es necesario hacer el mínimo detalle de todo lo que queremos modelar si no podemos seguir las propiedades estadísticas de lo que estamos modelando (p. ej., si estamos modelando una intervención quirúrgica, podríamos entretenernos en modelar todos los movimientos del cirujano teniendo en cuenta que nos interesa el tiempo que tarda en operar, nos deberíamos fijar en demasiados detalles como el tipo de intervención que se está realizando, la gravedad del paciente, complicaciones del paciente durante la intervención, la destreza del cirujano, también podríamos hacer unas ecuaciones que modelaran como va cortando el cirujano al paciente, si se equivoca o no se equivoca o, podríamos hacer una distribución de probabilidad que representara el histórico de lo que más tardan las intervenciones y ya con eso tendríamos esa parte resuelta del modelo).

Lo que se pretende con la simulación es centrarnos en los aspectos fundamentales y otros aspectos dejarlos modelados de forma estadística y avanzar de forma más sencilla en el modelo, el modelo debe contener únicamente aquellos elementos de la realidad necesarios para contestar la pregunta o resolver el problema.

Cuando tenemos un manejo del tiempo discreto, no nos quedamos con todos los instantes del tiempo sino que hacemos un pequeño muestreo y solo nos quedamos con los eventos más importantes (p. ej., nos interesa modelar el movimiento de cambiarnos de una silla a otra. Lo único que nos importa con los eventos discretos es que primero estamos sentados en la silla A y dentro de 3 segundos estamos sentados en la silla B, eso es lo que vamos a modelar, primer evento estar en la silla A, siguiente evento llegada a la silla B). Es decir, la simulación de eventos discretos se usa para modelar sistemas que cambian de estado en unos instantes concretos como resultado de la ocurrencia de eventos específicos.

Otra característica de los eventos discretos es que permiten **interacciones entre los elementos**, podemos modelar de forma natural como interaccionan los actores que participan en el sistema ya sea a través de una competencia por recursos por ejemplo o simplemente que las acciones de un elemento afectan a otro.

La simulación de eventos discretos ha sido ampliamente utilizada para la planificación y simulación de servicios hospitalarios (servicio de urgencias, citas, etc) como se ha visto en el *Capítulo 3*.

En el sector sanitario, este tipo de simulación se puede centrar en mejorar gestionar la capacidad de camas, horarios de los trabajadores, admisión de pacientes y programación de citas, utilización de recursos auxiliares (farmacia, laboratorios, etc) así como rastrear a los pacientes e incorporar todo tipo de características como su historial médico o el riesgo basal. También nos

permite modelar los flujos de pacientes y tiempos de espera con lo cual podemos hacer previsiones a corto, medio o largo plazo.

Los pacientes interactúan con el modelo y pueden experimentar eventos en cualquier momento discreto. A mayores, la simulación de eventos discretos (DES) proporciona la flexibilidad de incorporar recursos o capacidades explícitamente y tener en cuenta las interdependencias entre pacientes debido a los recursos o capacidades limitadas.

La DES por tanto nos sirve como herramienta basada en la evidencia que con la información obtenida a través de la simulación, permite al personal responsable del hospital evaluar la eficiencia de los servicios médicos existentes y reconfigurar los protocolos de atención a pacientes para mejorar la eficiencia del sistema sin alterar al sistema actual.

En este proyecto se desarrolla la simulación de eventos discretos del proceso de extracciones de sangre del Hospital Universitario Río Hortega.

### 4.3. Metodología de la simulación

El desarrollo de la simulación sigue una metodología *Step Wise*. Este tipo de metodología trata de responder a la pregunta: ¿Qué hago ahora?. Es muy útil tanto para pequeños como para grandes proyectos. Seguir los pasos que se describen a continuación de esta metodología que se describen a continuación, son fundamentales para el correcto desarrollo del modelo de simulación. [31]

- 1) **Establecer los objetivos:** el primer paso del proceso del desarrollo de la simulación es determinar los objetivos que se buscan. Podemos centrarnos en buscar todos los objetivos posibles y detallarlos al máximo pero en la simulación de eventos discretos lo más recomendable es centrarnos en no más de dos o tres objetivos. De este modo la búsqueda será más específica, se reducirá la complejidad del modelo y será viable en términos de recursos y tiempo. Los objetivos de la simulación de eventos discretos que se buscan en este trabajo se especifican en el *Capítulo 5* en la *Sección 5.2*.
- 2) **Recogida de datos:** esta fase es muy importante para poder desarrollar el modelo correctamente. Durante esta fase de recopilación de datos e información del servicio que se vaya a modelar debe ser lo suficientemente detallada para poder cumplir con los objetivos. No se debe caer en la sobre especificación o en recoger más datos de los necesarios ya que puede ser muy costoso en términos de esfuerzo, de tiempo del proyecto y en términos de privacidad (ver más en la *Sección 5.3.1* del *Capítulo 5*).

Tampoco se debe caer en la subespecificación, la información debe poder describir de forma similar a la realidad el proceso, si no se tiene la información necesaria no podremos modelar correctamente.

Una visión más detallada de los datos de nuestro proyecto se ofrecen en la *Sección 5.3* del

*Capítulo 5.* Los datos deben ser procesados y depurados antes de poder utilizarlos en la simulación, es una tarea ardua que requiere gran cantidad de tiempo pero imprescindible para la buena consecución de los objetivos.

3) **Construcción del modelo:** el desarrollo del modelo de simulación de eventos discretos involucra procesar todos los datos recopilados e integrarlos en el modelo. Para ello es necesario primero tener el modelo conceptual del proceso a simular y que debe mapear y describir el flujo del proceso. Se puede ver en la *Sección 5.4* del *Capítulo 5*.

4) **Verificación y validación:** este paso involucra toda la confirmación necesaria para poder verificar que todo lo desarrollado se ha realizado de la forma correcta. En nuestro proyecto contamos con el personal del servicio de extracciones, el cual se encargará de verificar en un futuro que el modelo desarrollado representa la realidad.

Validar el modelo implica que este se ajuste a los flujos de pacientes y del personal. Así como los tiempos. Los tiempos iniciales deben ser de las distribuciones que ajusten nuestros datos o, en su debida medida, utilizar una distribución más genérica de flujos de pacientes.

5) **Ensayos:** ¿Qué pasaría si...?

Esa es la pregunta a la que debemos responder en esta fase. Un modelo de simulación debe probar diferentes escenarios para determinar los efectos que provocan las diferencias de estos en el proceso modelado. Una vez que el modelo se ha validado, es posible crear diferentes escenarios de diversos modos, reestructurando las localizaciones, modificando los tiempos de atención al paciente, aforo de la sala de espera, etc.

6) **Recopilación de datos del modelo:** las estadísticas finales obtenidas del modelo de simulación, una vez analizadas, serán labor de estudio del personal responsable para tomar decisiones de optimización del servicio en base a la viabilidad de los escenarios modelados.

# Capítulo 5

## Caso de estudio

### 5.1. Proceso de extracciones

Esta sección no hubiera sido posible sin la colaboración de María Antonia y Nuria Tirador, ambas trabajadoras de este servicio y que nos han explicado detalladamente el funcionamiento del mismo. El servicio de extracciones del HURH opera de lunes a viernes excepto festivos, con un horario general de 8:00 a 15:00 dependiendo del box.

La mayoría de los pacientes tienen una visión muy sesgada de lo que consiste el proceso de extracciones, solo saben que les van a extraer sangre o a recoger una muestra pero es aquí donde empieza el proceso y que terminará cuando el médico reciba los análisis del paciente. Este proceso puede variar desde unos minutos a varias semanas o incluso meses, dependiendo de la urgencia y del tipo del análisis efectuado al paciente.

Una vez que se obtiene la extracción del paciente, es trabajo de los profesionales del laboratorio llevar a cabo los análisis, fundamentales para el diagnóstico, pronóstico y seguimiento de las enfermedades. Este proceso es muy extenso y complejo en función del tipo de análisis que se ha de llevar a cabo y no es de nuestro interés en nuestro estudio. En nuestro proyecto únicamente nos centraremos la simulación del proceso de extracción de sangre al paciente sin entrar en modelar la fase posterior que es el análisis de las muestras.

Este servicio se realiza enteramente en la segunda planta del HURH y consta de las siguientes secciones:

- Kiosko: el paciente introduce su historia clínica en el kiosko y recibe un ticket con un identificador de la cita.
- Recepción A - B: el paciente entrega el volante al personal, se escanea y se registra el procedimiento a realizar al paciente, en ese momento el paciente queda en espera a que se le llame desde box o muestras (dependiendo de la prueba). El paciente debe esperar en la sala de espera hasta que sea mostrado en las pantallas su identificador de la cita.
- Kiosko 2: refuerzo de recepción.

- Muestras: el paciente entrega las muestras (orina, heces, semen, etc).
- BOX 1: box de extracción de sangre de refuerzo.
- BOX 2: box de extracción de sangre que opera de 8:00 a 15:00.
- BOX 3: box de extracción de sangre que opera de 8:00 a 11:30.
- BOX 4: box de extracción de sangre que opera de 8:00 a 14:00.
- BOX 5: box de extracción de sangre que opera de 8:00 a 10:30.
- BOX 6: box de extracción de sangre de menores de edad de 8:00 a 10:15.

En las épocas en las que coinciden grandes festivos como Semana Santa, Navidad se aprecia un gran descenso en este servicio, el motivo es que este servicio únicamente trabaja los días hábiles. Sin embargo, a la vuelta de las festividades se produce un gran incremento coincidiendo normalmente con el lunes o martes siguiente.

En verano también se aprecia un gran descenso del servicio de las extracciones. Este descenso comienza en junio y se acentúa notablemente en agosto. Se debe a que los pacientes normalmente durante estos meses abandonan su lugar de residencia habitual y los médicos se encuentran de vacaciones por lo que las consultas se reducen y eso conlleva directamente una reducción del número de citaciones en las extracciones.

A la vuelta del verano, se aprecia un gran incremento de las extracciones sobre todo en el mes de septiembre, en el cual no pasa desapercibido el incremento de más de 2000 pacientes con respecto al mes de agosto, como se puede ver en el gráfico derecho de la *Figura 5.1* el cual, es el mismo gráfico que el de su izquierda pero ampliado para que se visualice el flujo de pacientes.

En la *Figura 5.2* podemos ver el plano de este proceso.

*Evolución del número de citaciones entre febrero de 2019 y febrero de 2020*

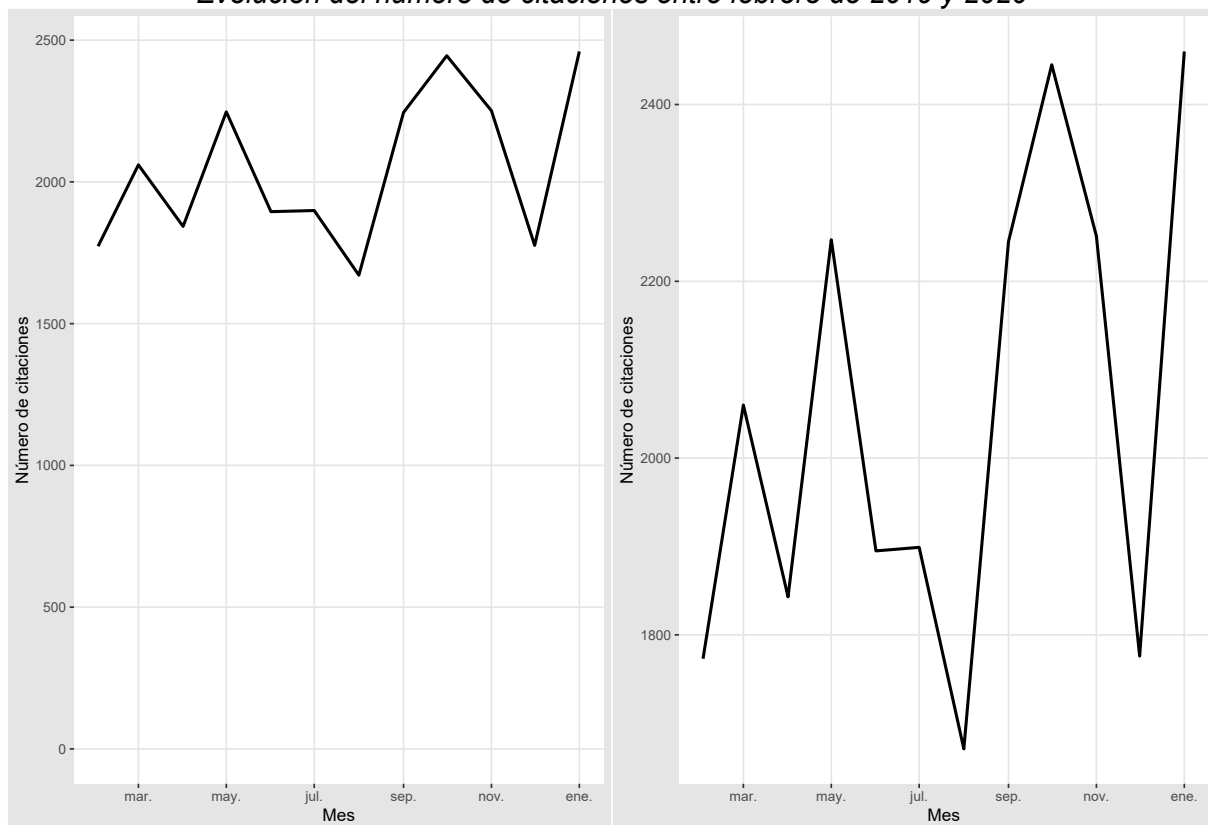


Figura 5.1: Evolución del número de citaciones en el servicio de extracciones comprendidas en el periodo entre febrero de 2019 y febrero de 2020

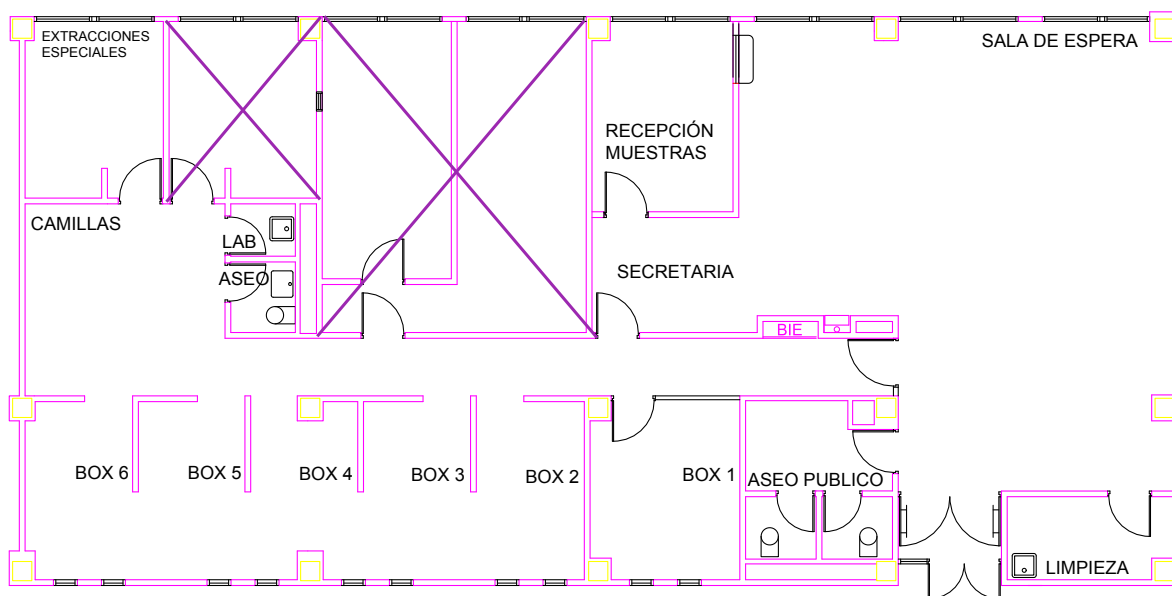


Figura 5.2: Plano de planta del servicio de extracciones

## 5.2. Objetivos

El primer objetivo del proyecto es comprender en su totalidad el funcionamiento del servicio de extracciones del HURH. Para ello ha sido necesario acudir en varias ocasiones a este servicio de modo que se pudiera observar la variabilidad entre días y distintas franjas horarias.

La simulación llevada a cabo nos permitirá corregir las posibles deficiencias del servicio. No todos los fallos son atribuibles al personal, más bien, el personal siempre intenta hacer su trabajo lo mejor posible. Donde se pueden detectar fallos es en el protocolo de atención, en el sistema informático provocando una larga espera o incluso que el servicio no esté construido de la forma más óptima.

Nuestro objetivo principal es simular la realidad para virtualmente detectar las ineficiencias que por cualquier razón en el servicio en el día a día no se aprecia la causa de los mismos.

## 5.3. Análisis de datos

Contamos con los datos reales recogidos de los pacientes a los que se les realizó una extracción de sangre entre el 1 de febrero de 2019 hasta el 1 de febrero de 2020.

En ese periodo de tiempo se han realizado un total de 29 891 extracciones, con una actividad diaria aproximada de 121 pacientes. Este servicio da cobertura al área de Salud de Valladolid Oeste que cuenta con una población de referencia de más de 250 000 usuarios [32]. El servicio de extracciones realiza las peticiones analíticas tanto de Atención Especializada como de Primaria, ya que cualquier especialidad médica es susceptible de ser solicitante de pruebas diagnósticas.

Contamos con 900 820 instancias y 10 atributos:

- Turno: identificador de la cita.
- Historia clínica: identificador de la historia clínica del paciente.
- Día de la cita.
- Hora de la cita.
- Origen: puesto de origen del paciente.
- Destino: puesto de destino del paciente.
- Hora de presencia en origen: hora en la que el paciente llega al servicio de extracciones.
- Hora de llamada en destino: hora en el que el paciente es llamado para realizarse toma de la muestra.
- Hora de atención en destino: hora en la que se realiza la toma de la muestra al paciente.
- Tipo de cita (normal o exprés): prioridad de la cita.

Se ha llevado a cabo un profundo filtrado y depuración de los datos originales. Es una de las primeras fases del preprocesado de los datos de entrada y se pretende eliminar las redundancias, inconsistencias, ruido, identificar *outliers* o valores extremos, valores desconocidos, etc.



Varias instancias de los datos con los que contamos presentan valores desconocidos para algunos atributos. Los atributos que presentan instancias desconocidas son los relativos al destino, las horas de presencia en origen, de llamada en destino y de atención en destino.

Se pueden llevar a cabo varias aproximaciones para dar un valor a estos datos desconocidos entre las que destacan:

- Uso de constante global: si existen muchos valores ausentes y estos no se encuentran distribuidos de manera uniforme, se puede utilizar un valor *unknown* para predecir la clase.
- Uso de la media, mediana y moda del atributo: esto es mejor realizarlo por clases.
- Uso del valor más probable: J48 y prácticamente todos los métodos de árboles de decisión incorporan un procedimiento para tratar la presencia de valores desconocidos creando un árbol con probabilidades. Esto asume una suposición que no siempre se cumple (el hecho de que un valor de un atributo sea desconocido es independiente de la clase). En muchas aplicaciones esto no es cierto y hay valores que son ausentes porque alguien no ha querido proporcionar el valor para una determinada clase.

Este tipo de aproximaciones modifican el conjunto de datos por lo que debemos de ser precavidos. Lo mejor es eliminar las instancias para las que hay valores ausentes, el resto de opciones siempre serán malas.

Eliminar el ruido (es una modificación de la señal original, no deseada y que la corrompe) de los datos depende de como vayamos a utilizar después el clasificador.

En cuanto al ruido de los atributos, puede ser mejor dejarlo. Si el clasificador va a ser utilizado en un entorno en el que hay ruido, es mejor no eliminarlo. Si por el contrario el clasificador se va a utilizar en un entorno en el que se puede eliminar el ruido, entonces es mejor eliminarlo.

El ruido en la clase puede ser sistemático (aparece por la propia naturaleza del medidor), el cual es mejor dejarlo o, puede ser asistemático (aparece por una mala manipulación de los datos), el cual es mejor eliminarlo.

Nos encontramos con outliers o valores extremos de pacientes que pueden perjudicar a la simulación. Por ejemplo, pacientes que hayan tardado más de 20 minutos en Muestras. Una forma sencilla de darnos cuenta de que son outliers es usar únicamente datos que se queden con el 95% de la población omitiendo el 2.5% superior e inferior.

Una vez que se haya procedido a la depuración de los datos, se deben procesar más detalladamente antes de llevarlos a cabo en la simulación. Es importante destacar que la recopilación de datos, depuración, procesado de la base de datos así como la obtención de distribuciones estadísticas una vez validado el modelo, abarca la mayor parte del tiempo del desarrollo de la simulación. La validación y la obtención de las distribuciones estadísticas del modelo no está en el alcance de este TFG.

### 5.3.1. Anonimización de datos

El tratamiento y la explotación de grandes volúmenes de información pueden ofrecer múltiples beneficios a la sociedad siempre que se respeten los derechos de las personas, su privacidad y la protección de sus datos personales [33].

La Real Academia Española (RAE) define la privacidad como el ámbito de la vida privada que se tiene derecho a proteger de cualquier intromisión.

Cuando hablamos de privacidad dentro del ámbito informático nos referimos al derecho de un usuario a que sus datos, a pesar de poder estar en posesión de segundas personas, estén protegidos y no sean visibles sin su consentimiento [34]. Por ello, la privacidad dentro de la informática tiene como objetivo establecer qué datos pueden o no compartirse una vez obtenidos. La información es un recurso fundamental que puede garantizar el avance de la sociedad de la información sin dejar de lado el respeto a la protección de datos.

Los datos con los que contamos contienen información real de pacientes que han acudido a realizarse una extracción de sangre al Hospital Universitario Río Hortega. Para poder cumplir con la protección de datos, es preciso garantizar la irreversibilidad de la anonimización.

La anonimización de los datos elimina las posibles formas de identificación de las personas. Nunca es absoluta pero el esfuerzo de reidentificación de los sujetos sería lo suficientemente elevado haciendo que el posible beneficio de la obtención de los datos personales pueda llegar a ser despreciable o bien dicho esfuerzo no pueda ser asumible por la persona o entidad con acceso a la información anonimizada. En términos de relación esfuerzo-beneficio no podría ser abordado debido al elevado coste de reidentificación.

Se ha reducido al máximo el número de variables que permitían la identificación de las personas (tanto los microdatos o identificadores directos de las personas como los identificadores indirectos o cuasi-identificadores) y que no eran relevantes para este proyecto optimizando el coste computacional de las operaciones con datos anonimizados.

El hecho de haber limitado la información existente a los mínimos necesarios implica de forma directa una reducción del riesgo de reidentificación y el riesgo inherente: filtración de información, vulneración del deber de secreto, pérdida de información, brechas de seguridad, robos de claves, etc.

## 5.4. Modelo conceptual

Los modelos conceptuales son diagramas de flujo que mapean en nuestro caso los flujos de pacientes y describen los eventos del proceso a simular sin depender de ningún software. Una vez que tengamos construido este diagrama de flujo pasaremos a simular el modelo en el siguiente capítulo.

Para poder construir, verificar y validar el flujograma, agradecemos la colaboración del servicio

de extracciones del HURH permitiéndonos acudir a realizar un estudio de tiempos y movimientos necesario para la realización del modelo conceptual.

Para poder construir el diagrama de flujo primero es necesario contar con la información y conocimiento suficiente del proceso de extracciones, de este modo podremos pasar a modelarlo. Nuria Tirador y demás personal de extracciones han colaborado en explicárnoslo detalladamente.

Un paciente que acude al servicio de extracciones puede realizarse múltiples análisis en una misma cita y de diferente tipología. Cuando un paciente llega a la sala de extracciones, debe introducir en un kiosco o terminal localizado en la entrada de la sala su historia clínica. Este kiosco es el responsable de registrar que el paciente ha acudido a la cita, se registra la hora de llegada y pasa a darle un ticket con su número de cita. En este momento el paciente pasa a la sala de espera hasta que es llamado por alguna de las pantallas a acudir a recepción.

Es importante destacar que un paciente que llega se adelanta o retrasa bastante a la hora de su cita, el kiosco lo penalizará. Con esto se pretende que los pacientes no acudan en a una hora que no les corresponda pero esto puede acarrear una gran desventaja produciéndose una saturación de la sala de espera si múltiples pacientes que han llegado fuera de su hora se juntan con los pacientes que se encuentran ya esperando a su turno en su hora correcta.

Cuando a un paciente se le notifica a través de las pantallas para acudir a recepción, en este momento se registra el instante en el que ha sido llamado. El personal de recepción le recoge el volante de las pruebas que debe realizarse y las registran en el sistema. Cuando se acaban de introducir las pruebas que debe realizarse el cliente, se guarda en el sistema y el paciente debe esperar en la sala de espera a que sea llamado por una de las pantallas para realizarse el análisis. Este instante de tiempo también queda registrado (en el momento en el que el paciente abandona recepción, el tiempo de espera del paciente empieza a contar).

A continuación, vamos a ver de forma esquematizada los procesos que siguen los distintos tipos de pacientes que acuden a extracciones.

En la *Sección 5.3* distinguíamos dos tipos de citas, la normal y la exprés. La cita exprés tiene prioridad sobre el resto de pacientes que hay en espera y por tanto será atendido antes. El paciente con una cita normal debe esperar sin ningún tipo de prioridad sobre el resto de pacientes. Esto no es posible modelarlo en los diagramas de flujo pero sí en la programación, donde en función del tipo de cita será asignada una prioridad, de esta forma conseguimos que estos pacientes sean atendidos antes que el resto.

Se opta por explicar un diagrama de flujo por cada tipo de paciente con el fin de facilitar su comprensión a aquellas personas no habituadas al uso de este tipo de esquemas y su mayor facilidad a la hora de modelar a un nuevo tipo de paciente ya que con esto se evita que el diagrama único sea excesivamente complejo al tener varios pacientes con diferentes tipos de pruebas. Todos los pacientes tienen su primera parte en común que es su registro en kiosco y deben acudir a recepción cuando sean llamados pero el resto del proceso varía en función del tipo de prueba que se debe realizar.

### 5.4.1. Flujograma paciente de extracción de sangre

Este procedimiento es muy habitual, consiste en extraer sangre por medio de una punción efectuada por el personal de enfermería. Dependiendo del tipo de prueba las técnicas difieren, por ello y en base a los resultados de la simulación puede ser interesante llevar a cabo un cambio en la política de asignación de citas.

El 78 %<sup>1</sup> de los pacientes acuden a realizarse un tipo de prueba que si bien puede necesitar de varias extracciones, éstas pueden ser realizadas en una única atención. Otros pacientes se realizan otros tipo de pruebas, denominadas curvas, pudiendo ser de glucosa, prolactina, etc que requieren de una prueba basal y sucesivas con un tiempo de espera que varían entre los 30 y los 60 minutos. Aquellos pacientes que requieren varias extracciones en un periodo de tiempo prolongado durante la mañana suelen permanecer esperando en el lugar habilitado para ello.

### 5.4.2. Flujograma paciente de muestras

Este tipo de pacientes acude a entregar una muestra. No requiere mucho tiempo porque se limita a entregársela al técnico encargado de las muestras. Este tipo de pacientes representa el 22 % de los pacientes.

Un 8 % de pacientes requieren además de otro tipo de pruebas en las que sea necesario extraerse sangre, primero será llamado por muestras para entregarla y posteriormente será llamado para ser atendido en alguno de los boxes encargados de las extracciones. También puede realizarse una o varias extracciones (curvas). Representando estos últimos un 15 % de los pacientes.

### 5.4.3. Flujograma completo

La figura 5.3 muestra una representación en forma de esquema del modelo conceptual.

El modelo ha sido construido para representar el proceso de extracciones desde la llegada del paciente hasta que finaliza la atención distinguiendo los diferentes tipos de pacientes en función de los análisis a realizar.

Las salas de espera (representadas en color azul) hacen referencia a una espera con una duración de entre 30 minutos y 1 hora (depende de la prueba). Esta espera es necesaria cuando un paciente acude a realizarse una prueba denominada generalmente “curvas”. Se trata de extracciones de sangre separadas ese tiempo determinado y pueden ser dos, tres o cuatro mediciones adicionales en función del tipo de prueba. El paciente debe de permanecer en reposo, sin comer, beber agua de forma limitada y sin fumar en las 3 horas (como máximo) que dura la prueba más extendida en el tiempo por lo que generalmente permanecen en la sala de espera del servicio de extracciones todo este tiempo, esperando con el resto de pacientes.

En el programa de simulación FlexSim se ha desarrollado el flujograma de la *Figura 5.4*.

---

<sup>1</sup>Las estadísticas de los pacientes no se corresponden con las reales.



Existen dos formas de afrontar la programación:

- Un flujograma para cada paciente.
- Un único flujograma para todos los tipos de pacientes.

En nuestro caso, se ha optado por la segunda opción, es decir, programar todos los pacientes en un único flujograma. Esto añade una cierta complejidad al modelo pues a la hora de detectar errores hay que revisar absolutamente todo el flujograma. Crear varios flujogramas (uno para cada paciente) añade otra complejidad, la programación es mayor y los pacientes comparten varias similitudes, por lo que se tiene código redundante repetido de forma más frecuente.

Una buena práctica de programación es ir corriendo la simulación cada vez que se realiza un bloque nuevo, si vemos que se ajusta de forma aproximada a la realidad, seguimos programando. Sino, sabemos que tenemos que realizar ciertas modificaciones que seguramente se nos hayan pasado por alto.

Se muestran de forma separada en la *Figura 5.5* y en la *Figura 5.6* debido a que la resolución de la *Figura 5.4* imposibilita su lectura.

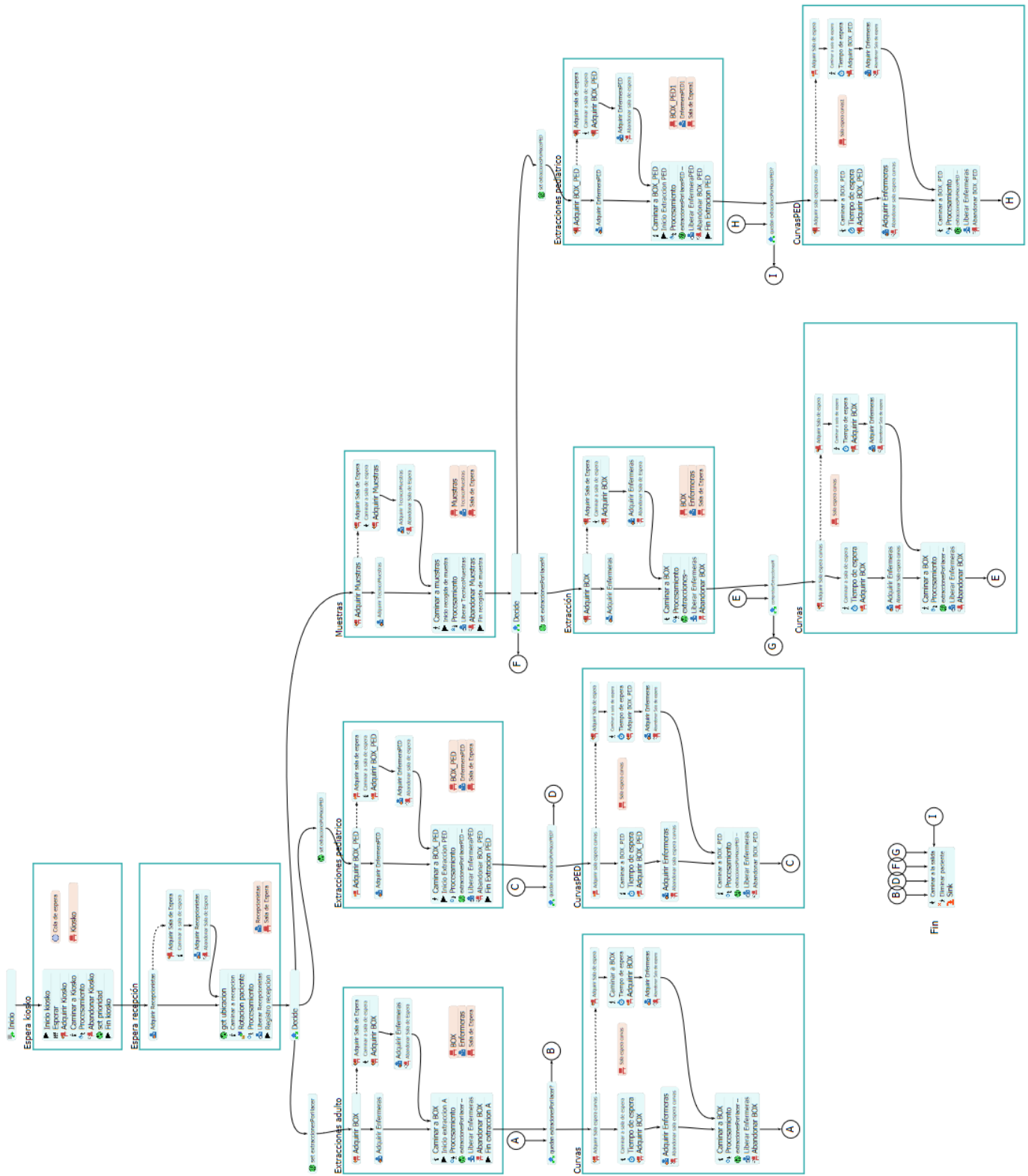


Figura 5.4: Flujo de trabajo completo en FlexSim

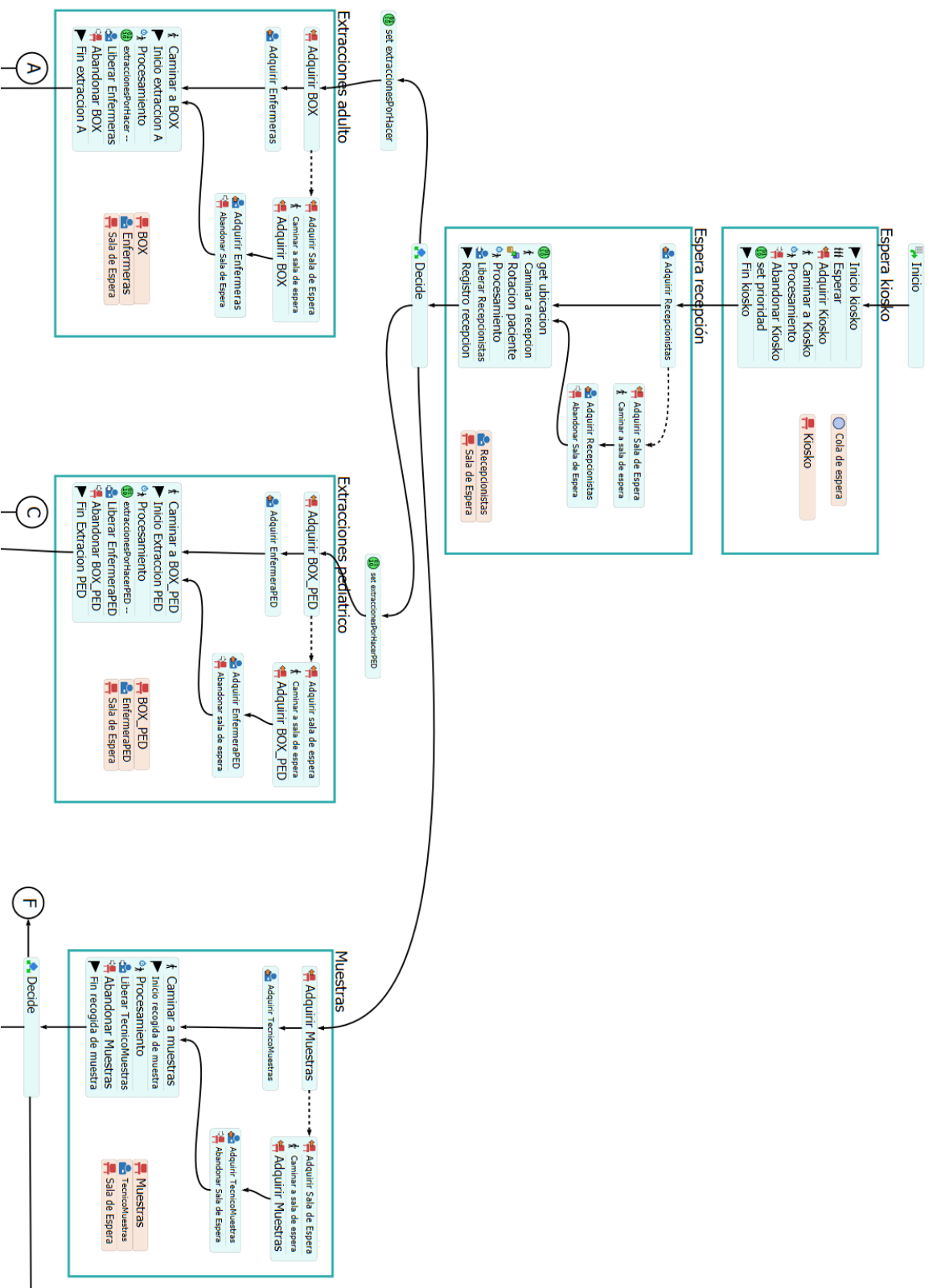


Figura 5.5: Flujiograma en FlexSim - Parte I



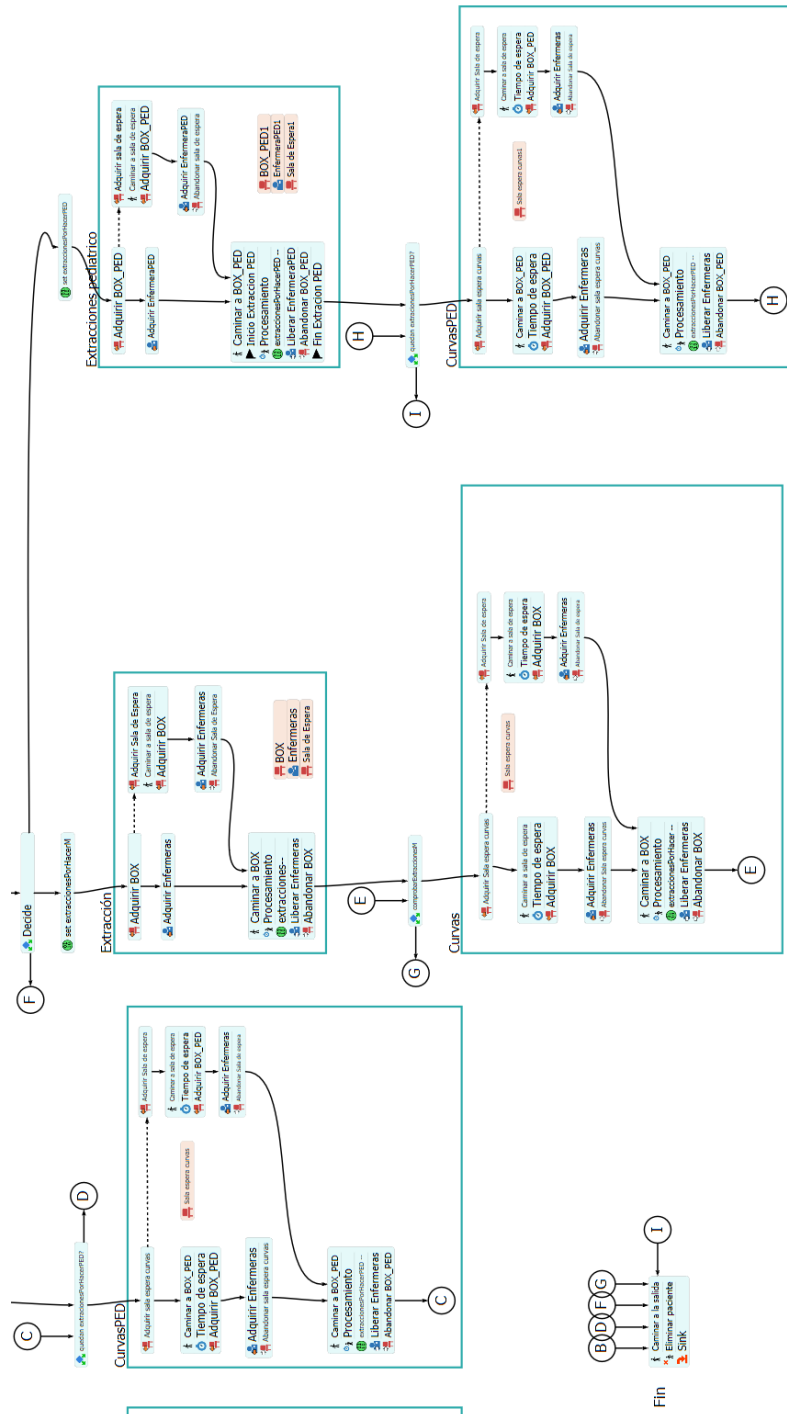


Figura 5.6: Flujoograma en FlexSim - Parte II

## 5.5. Programación del flujograma

En esta Sección se va a explicar de forma detallada la programación de cada tipo de paciente realizada.

Todos los pacientes tienen una parte común, esta parte es la que se muestra en la *Figura 5.7*.

### 5.5.1. Espera kiosko

Este bloque modela el proceso que sigue un paciente para adquirir el número de cita.

Al inicio, hay una bandera negra en la que pone “Inicio Kiosko”, la bandera significa que es un milestone o token y comienza a contar el tiempo en ese momento. “Esperar” lo que modela es la espera en la cola, el paciente se queda esperando detrás del paciente inmediatamente anterior a él, de forma que no se sitúa visualmente encima, es un comportamiento para representar la realidad de forma visual. “Adquirir kiosko” modela que el paciente solicita el kiosko, es decir, se pone a la cola, es como coger un turno. Cuando el kiosko se libera, es decir, le toca su turno, debe “Caminar a kiosko”. La obtención del número de la cita lleva un tiempo de “Procesamiento” de unos 20 segundos. El paciente debe liberar el kiosko, por eso se programa “Abandonar kiosko”. “Set prioridad” sirve para establecer una etiqueta de prioridad de la cita de los pacientes en función de si es exprés o normal en base a unos porcentajes. El milestone o token de Fin Kiosko toma la medición de tiempo de ese momento, que es cuando se libera el kiosko y se pasa a la siguiente fase.

### 5.5.2. Espera recepción

En este caso se modela la espera de un paciente para registrar su prueba en recepción.

En el anterior bloque teníamos un milestone que era “Fin kiosko”, este token nos sirve para marcar el fin del anterior bloque y el inicio del actual.

El paciente debe esperar a que se le llame para acudir a recepción, es por esto por lo que aparece “Adquirir recepcionistas”, porque puede ser llamado por cualquiera de las disponibles. En el caso de que no estuvieran libres, el paciente debe esperar en la sala de espera hasta que se le notifica, por eso la flecha derecha de puntos discontinuos.

El paciente debe adquirir la sala de espera (si no hay hueco, “pide” turno para sentarse, cuando un paciente lo libera, se sienta), se dirige a ella “Caminar a sala de espera” y si hay huecos disponibles se sienta. Espera a que el recepcionista se liberen y le llamen, cuando le toca su turno libera la sala de espera “Abandonar sala de espera” y se dirige al mostrador “get ubicación” y “Caminar a recepción”. En este caso es necesario modelar esa etiqueta porque el paciente en realidad no adquiere una ubicación, sino que adquiere al personal, por eso es necesario mandarle detrás del mostrador, para que su comportamiento sea similar a la realidad. “Rotación paciente” es la programación llevada a cabo para que se sitúe enfrente del mostrador.

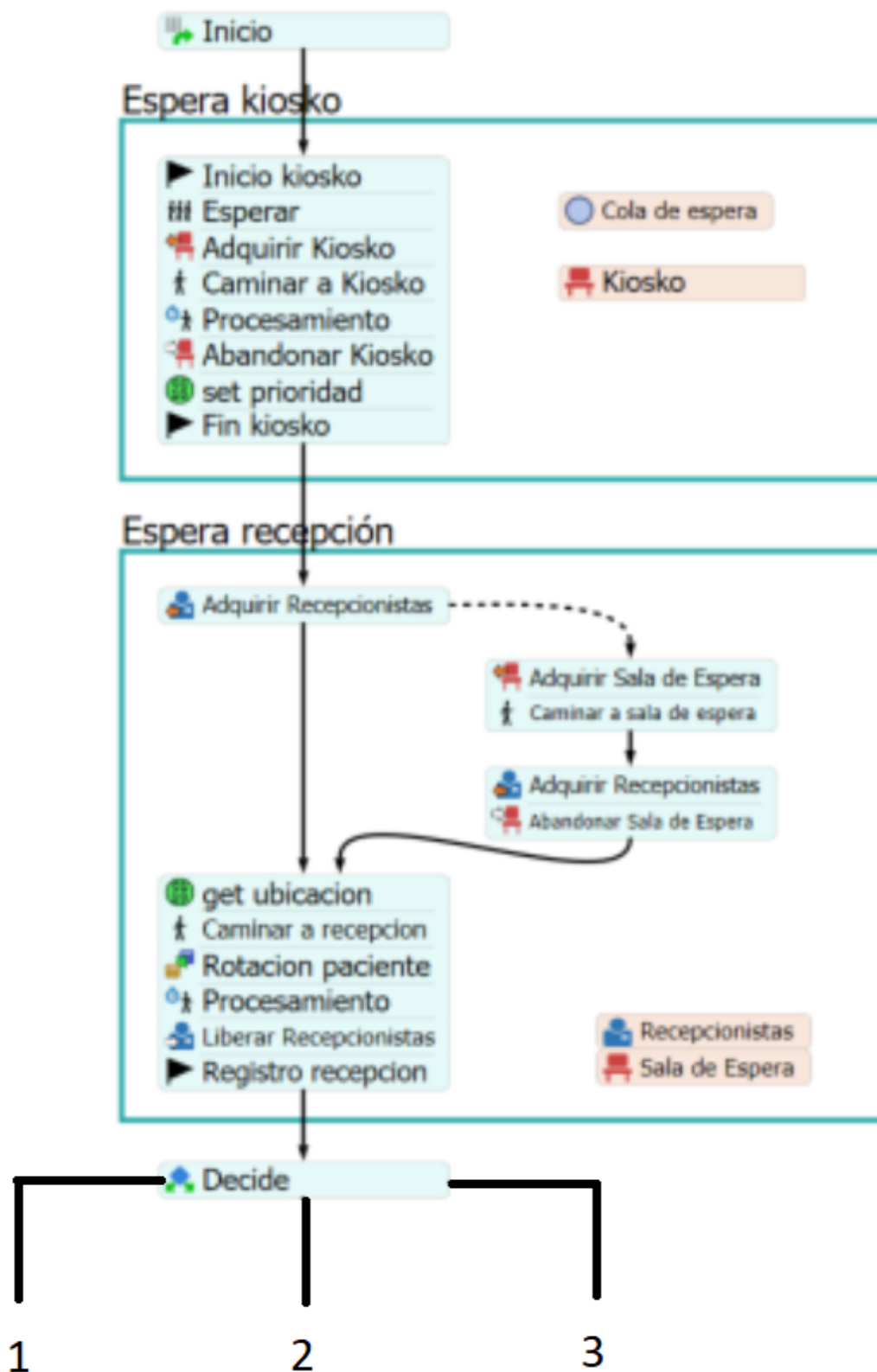


Figura 5.7: Flujograma en FlexSim - Parte común

El registro del tipo de prueba lleva un tiempo de administración “Procesamiento”, se ha fijado en 163 segundos. Cuando finaliza, se abandona recepción “Liberar recepcionistas”.

Se registra el tiempo con el milestone “Registro recepción”.

Se programan los tipos de pacientes (1, 2 ó 3) en función de la prueba que van a realizarse, en base a unos porcentajes.

### 5.5.3. Paciente de Tipo 1 - Extracciones

En la *Figura 5.8* se muestra el bloque de programación de un paciente que únicamente acude a realizarse extracciones.

En primer lugar, se establece, mediante unos porcentajes, el número de extracciones que se deben realizar los pacientes. Así unos acudirán únicamente a realizarse una única extracción mientras que otros, tendrán una serie de curvas.

**Extracciones adulto:** De forma similar al proceso seguido anteriormente, para adquirir una localización tiene que, de alguna forma, pedir una especie de ticket, esto se representa con “Adquirir BOX”. Si el BOX está ocupado, el paciente vuelve a acudir a la sala de espera “Adquirir sala de espera”, “Caminar a sala de espera”, “Adquirir BOX”.

Una vez que es llamado para acudir a BOX, “Adquirir enfermeras” y “Abandonar sala de espera”.

Si el paciente fuera llamado directamente al finalizar en recepción, no requeriría acudir a la sala de espera por lo que tomaría la primera vía, la de la flecha izquierda no salteada.

El paciente se dirige al BOX “Caminar a BOX”, se realiza una medición de tiempo “Inicio extracción A” que requiere un tiempo de “Procesamiento”, en nuestro caso, establecido en 122 segundos y se resta una extracción “extraccionesPorHacer–”, se libera a la enfermera “Liberar enfermeras”, se abandona (libera) el BOX “Abandonar BOX” y se realiza una medición de tiempos “Fin extracción A”.

Se comprueba el número de extracciones que le quedan al paciente por realizar “quedan extraccionesPorHacer?” y, si es igual a 0, continúa por la flecha “B” para abandonar el servicio.

**Curvas:** Este bloque es similar al anterior, lo único que varía es que se le añade obligatoriamente un “Tiempo de espera” en función del tipo de prueba. Además, existen ahora dos salas de espera, la de la línea discontinua hace referencia a zona trasera, donde se localizan las camillas y las sillas adicionales.

La flecha “A” comprueba otra vez el número de extracciones que le quedan al paciente y si aún le faltan por hacer, vuelve a repetirse el bloque. Así hasta que abandona el servicio por la flecha “B”.

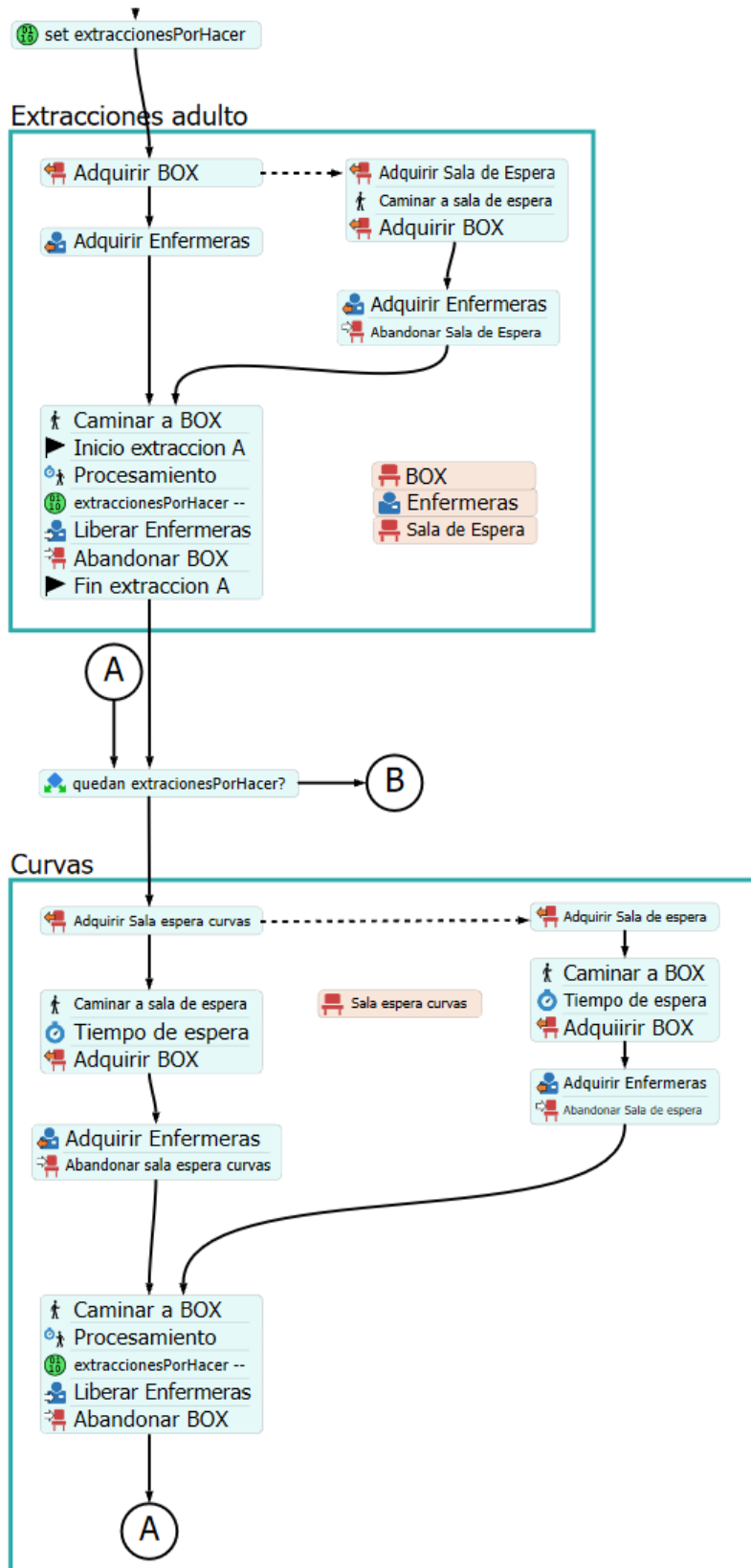


Figura 5.8: Flujograma en FlexSim - extracciones (Tipo 1)

#### **5.5.4. Paciente de Tipo 2 - Extracciones pediátricas**

En la *Figura 5.9* se muestra el bloque de programación de un paciente pediátrico que acude a realizarse una extracción.

Este bloque es similar al paciente de Tipo 1, sin embargo, es el asociado a pediatría. La única diferencia es que en este caso el paciente acude al BOX 6 (pediatría) mientras que en el anterior, acude a cualquiera entre el 1 y el 5.

#### **5.5.5. Paciente de Tipo 3 - Muestras**

En la *Figura 5.10* se muestra el bloque de programación genérico de un paciente que acude a muestras.

Todo aquel paciente que acude al Servicio de Extracciones con una cita que conlleva una muestra, en primer lugar, es llamado por Muestras para entregarla.

Posteriormente, el paciente puede que deba realizarse a mayores unas extracciones de sangre. Esto se decide en el “decide”, donde en base a unos porcentajes se decide si el paciente es adulto o pediátrico y, luego, se establece en el label de las extracciones por hacer, también en base a unos porcentajes.

Los bloques siguientes son similares a los explicados anteriormente por lo que no se explican.

#### **5.5.6. Abandono del Servicio de Extracciones**

En la *Figura 5.11* se muestra el bloque de programación en el que un paciente abandona el Servicio de Extracciones.

Cuando el paciente acaba, se dirige a la salida (que en este caso es la puerta de entrada) “Caminar a la salida”, y se elimina el paciente del visual del programa “Eliminar paciente” y “Sink”.

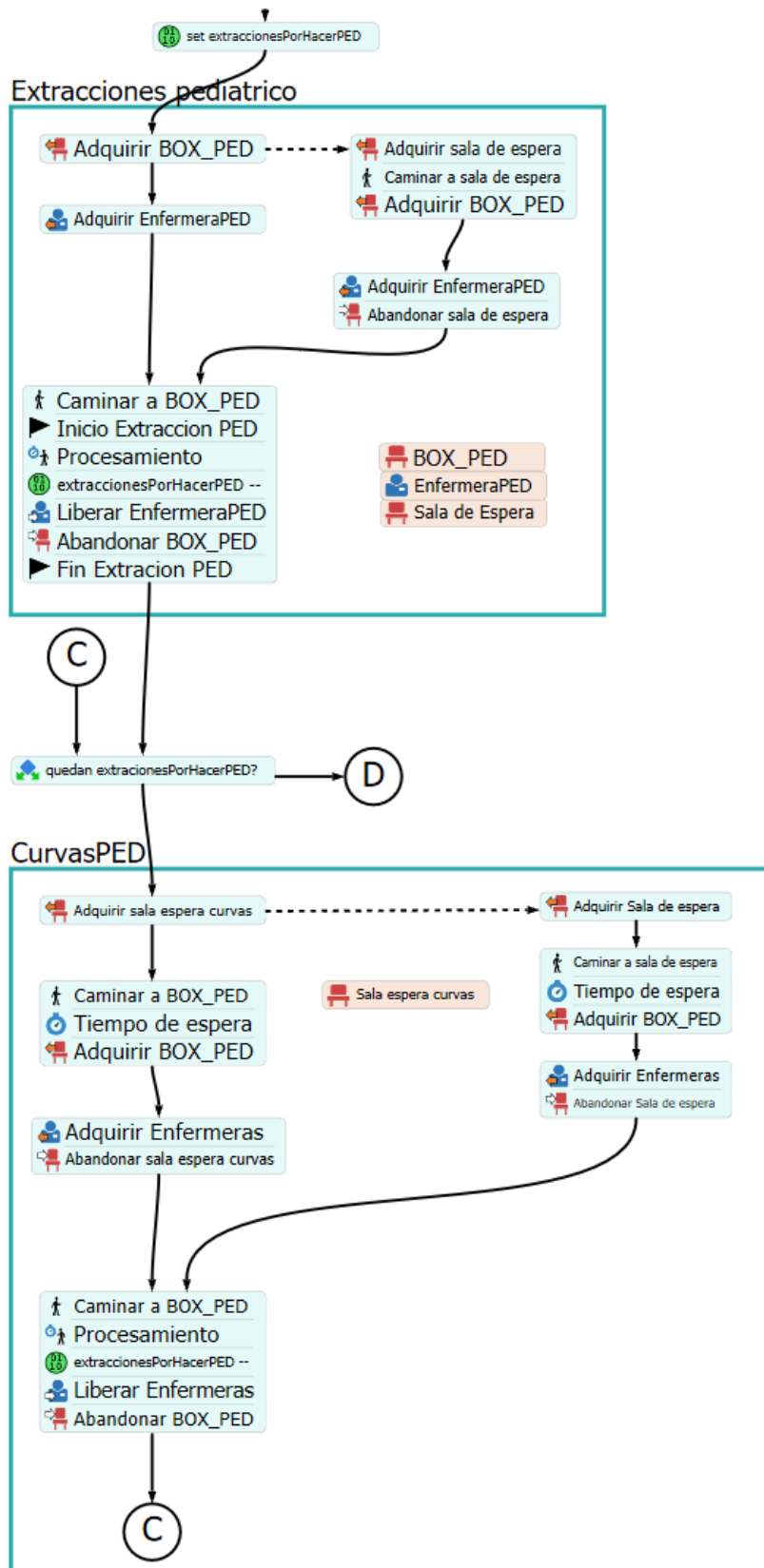


Figura 5.9: Flujograma en FlexSim - extracciones (Tipo 2)

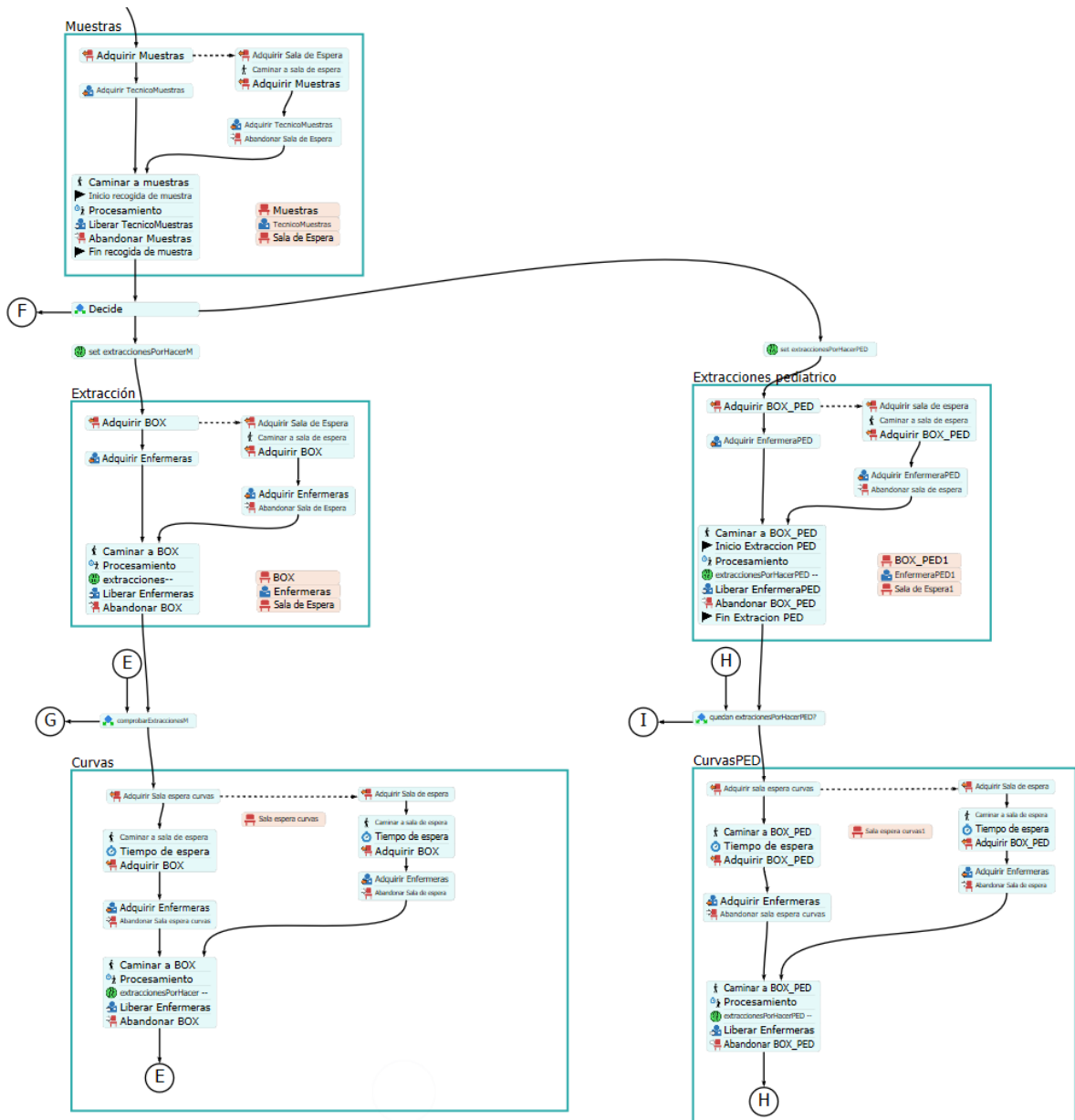


Figura 5.10: Flujograma en FlexSim - Muestras (Tipo 3)

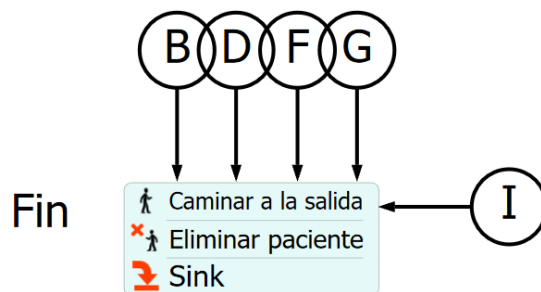


Figura 5.11: Flujograma en FlexSim - Abandono del Servicio de Extracciones



## Capítulo 6

# Construcción del modelo en FlexSim

En este capítulo se explica de forma resumida el proceso seguido para la construcción del modelo del Servicio de Extracciones del Hospital Universitario Río Hortega.

El código desarrollado a partir de las librerías de FlexSim para la construcción del gemelo digital, consta en el *Apéndice A*. Una explicación más detallada de su construcción consta en un manual que yo mismo he elaborado de cara a los proyectos que puedan surgir en el futuro. En el *Apéndice B* aparece el manual completo.

Flexsim es el software de simulación 3D de eventos discretos que se utiliza en el HURH. Este programa nos permite programar (C++), modelar, analizar, visualizar y tomar decisiones para la mejora en base a las estadísticas obtenidas de los servicios médicos que se programen.

Para poder modelar el proceso de este proyecto de forma que se asemeje a la realidad se ha contado con la colaboración del personal del Servicio de Extracciones.

### 6.1. Construcción del 3D

En primer lugar, insertamos en FlexSim el plano de planta visto en la *Figura 5.2*, lo ajustamos a las medidas con las que decidamos trabajar en el modelo y posteriormente levantamos las paredes del Servicio de Extracciones junto a las ventanas, con sus respectivos ajustes visuales. Por último se sitúa al personal, objetos (mesas, sillas, baños, puertas, etc.). El resultado se muestra en las siguientes figuras:

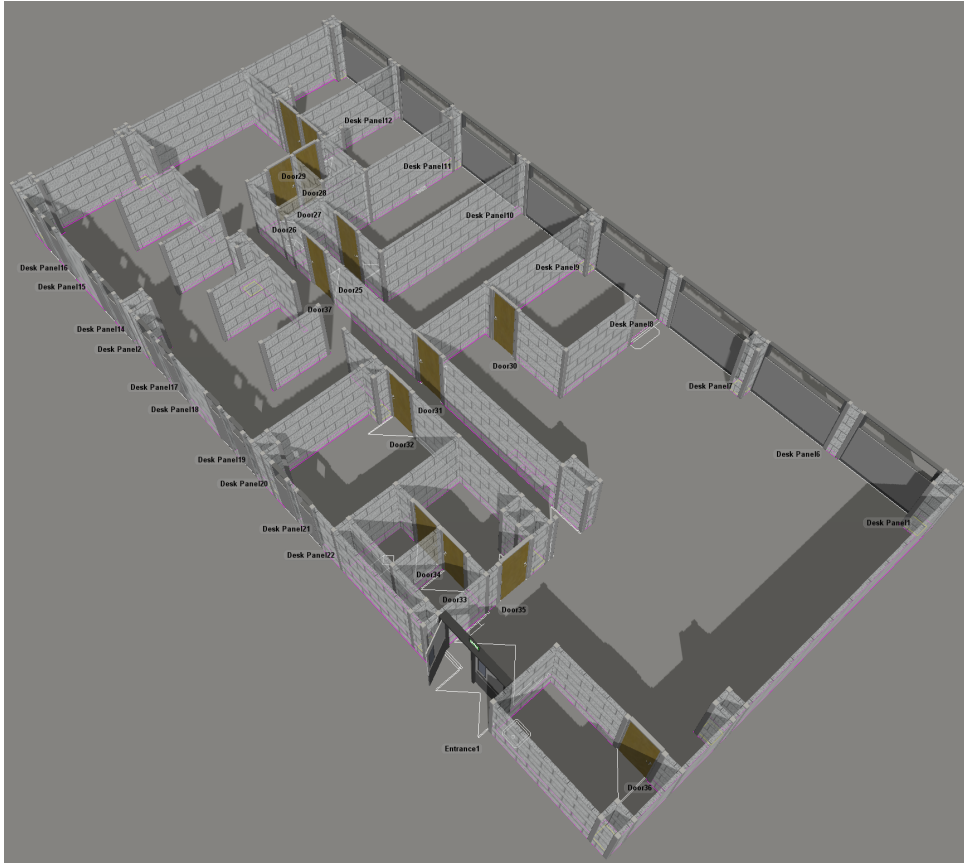


Figura 6.1: Plano del Servicio de Extracciones en 3D (puertas, paredes y ventanas)

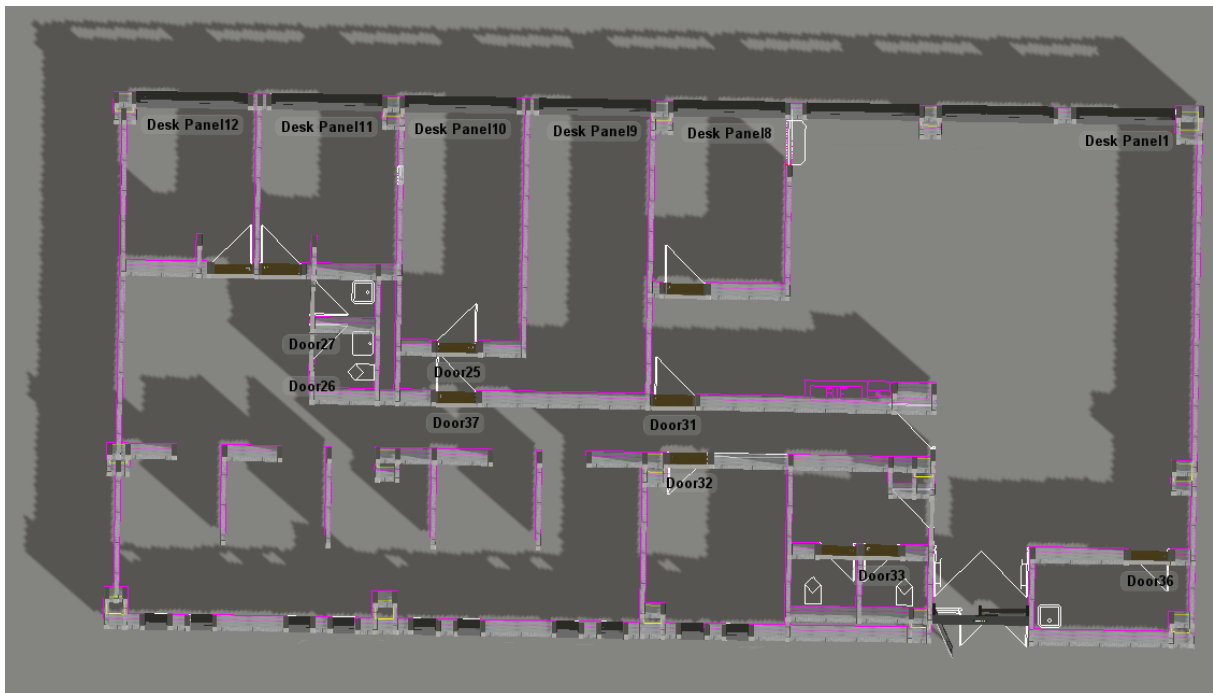


Figura 6.2: Plano de planta del Servicio de Extracciones en 3D (vista TOP)

La sala de espera cuenta con un aforo de 45 personas sentadas, 15 de las sillas están reservadas para embarazadas (acuden a realizarse curvas por lo que la tipología de la prueba requiere de varias horas de espera con extracciones entre media). Los pacientes que además se realizan curvas, tienen otras zonas reservadas más tranquilas o en el caso de que la sala de espera estuviera llena. Esta zona se visualiza en el plano de la *Figura 6.3* y de la *Figura 6.4*, cuenta con una posible ocupación adicional de 4 pacientes en sillas y 4 en camillas.

En la *Figura 6.3* hay 3 zonas que no se han representado porque pertenecen al servicio de reproducción asistida, el cual no es objeto de estudio de este proyecto.

Se muestran, a continuación, los planos con los objetos y el personal del Servicio de Extracciones. Es una representación del servicio en la actualidad.



Figura 6.3: Plano del Servicio de Extracciones en 3D



Figura 6.4: Plano del Servicio de Extracciones en 3D (vista TOP)

De los objetos que aparecen en la *Figura 6.4* podemos distinguir dos tipos, los objetos de tipo prop y los de tipo location. Se distinguen porque los objetos prop (ventanas, mesas, paredes, etc.) son meros objetos estéticos que no aportan estadísticas al modelo; sin embargo, los objetos de tipo location (sillas, camillas, ordenador, kiosko, etc.) sí que aportan valor a la simulación, son objetos con los que los pacientes y el personal interactúan para llevar a cabo sus tareas. La estética de todos los objetos puede ser modificada, tanto si es de tipo prop como si es de tipo location (o multilocation: sala de espera). La sala de espera, además, tiene unas propiedades diferentes a los objetos de tipo location. Las sillas que componen la sala en este caso pueden ser modificadas tanto en número, como en estética, como en aforo, pudiendo, por ejemplo, limitar el aforo al 33% (aforo COVID-19).

Una vez que tengamos todos los objetos y el personal representado, debemos programar como queremos que se comporte la simulación en términos visuales. En la *Figura 6.3* y en la *Figura 6.4* se puede ver como el personal tiene dos cuadrados rojos junto a ellos con una línea que los une. Esto se debe a que hemos asociado, al personal perteneciente a los mismos, a su silla. La finalidad de esto es que cuando la simulación se inicia, el personal se sentará en el objeto con el que está unido.

Cuando un paciente acude a recepción, lo mandamos a unos cuadrados azules junto al mostrador que a su vez están unidos mediante unos cuadrados rojos al personal de recepción. El motivo de realizar esto es que el paciente se comporte como en la realidad, acude al mostrador y debe situarse donde le indicamos. No hay otra forma de realizar eso sin programación C++.

A continuación, lo que debemos de modelizar es la lógica del proceso, la cual se vio en la *Figura 5.4*. Cada sección de ese flujograma tiene especificado un personal que debe atender a cada tipo de paciente, así como las distribuciones de los tiempos que siguen los procesos y el comportamiento en términos de flujo en la actualidad.

## 6.2. Piscinas de recursos

Una piscina de recursos puede hacer referencia tanto a un grupo de personas como a un grupo de objetos. Los grupos deben ser una representación de la realidad.

En nuestro proyecto contamos con varias piscinas de recursos, una buena práctica de programación es crear una piscina incluso aunque solo contenga un único profesional u objeto pues en el futuro abre a nuevas incorporaciones en dichas piscinas. Contamos con las siguientes piscinas de recursos:

Personal:

- Recepcionistas: 2 personas.
- Enfermería: 6 personas.
- Enfermería pediátrica: 1 persona.
- TCAE: 1 persona (encargada de recoger las muestras, de reponer material y de enviar las extracciones y muestras recogidas).

Localizaciones:

- Sala de espera principal: 45 sillas.
- Sala de espera de curvas: 4 camillas, 5 sillas. (15 sillas adicionales de la sala de espera principal).
- Boxes: 6 boxes.
- Recepción: 1 mesa.
- Muestras: 1 mesa.
- Salas de espera: sala de espera principal y sala de espera de curvas.

Una buena práctica de programación es formar siempre grupos, aunque solo contengan a un único objeto o persona. De cara al futuro será mucho más sencillo el desarrollo, estando ya el código asociado a una piscina de recursos, únicamente se debe ampliar el contenido de esta pues la referencia ya está creada.

## 6.3. Tipos de pacientes

Los diferentes tipos de pacientes se han explicado ya en la *Sección 5.4*, y se ha visto el flujograma completo en la *Sección 5.4.3*. Los pacientes se programan de forma diferente en función del tipo,

tiempos de llegada y tiempos de atención, así como la edad, el visual (apariencia), distancia recorrida (metros por segundo), prioridad, etc.

Esta es la parte más compleja del modelo y la que realmente va a aportar valor a la simulación. Cuanto más nos acerquemos en términos de programación a la realidad del paciente, mayor viabilidad tendrá el modelo.

Programación llevada a cabo en función del tipo de paciente (no se distingue la velocidad en función del sexo) [35]:

- < 70 años: 1.1 m/s.
- 70 - 75 años: 0.9 m/s.
- 76 -80 años: 0.8 m/s.
- > 80 años: 0.65 m/s.

## 6.4. Creación de individuos

El personal sanitario permanece situado desde su creación en sus puestos de trabajo. Es posible modelar los descansos diarios, así como las vacaciones anuales y/o posibles tareas que deban realizar cuando no atienden a pacientes. El personal TCAE, por ejemplo, debe ir recogiendo las extracciones realizadas en los boxes, así como las muestras de los pacientes en su respectiva ventanilla y enviarlas por un tubo neumático al laboratorio; además de reponer el material utilizado. Esos tiempos que conllevan las subtareas, se pueden modelar en base a tokens, se contabiliza el número de pacientes, así como las extracciones realizadas para cada uno de ellos de modo que, el personal TCAE realice la tarea cuando corresponda.

Los pacientes se crean en la primera puerta, la de la derecha de la imagen de la *Figura 6.2*. El motivo de esto es que los pacientes vayan generándose al principio del pasillo, de esta forma se representa la realidad del proceso. Posteriormente los pacientes acudirán al kiosco, situado junto a la segunda puerta, esta vez la que da acceso al interior de la sala de espera del Servicio de Extracciones. La cola de espera se representa con unas flechas blancas y grises y será donde los pacientes esperen a que el kiosco quede libre.

La eliminación de los pacientes se realiza del mismo modo, acuden a la segunda puerta antes de desaparecer completamente del modelo.

## 6.5. Vías clínicas

Se debe modelar, a mayores, las zonas de circulación de los pacientes. De lo contrario, atravesarán puertas, paredes y ventanas, lo cual, evidentemente, no es realista. Se deben de limitar, además, aquellas estancias restringidas al personal sanitario. Esto se modela limitando el acceso a los pacientes con diversos divider que se sitúan encima de las puertas o accesos (si eres personal sanitario puedes acceder, sino no).

En el desarrollo de la simulación, así como cuando llega a su fin, se puede visualizar el mapa de calor de zonas. Este mapa indica en base a unos colores cuales son las zonas más transitadas del servicio. En este modelo es muy sencillo de averiguar ya que únicamente disponen de dos posibles vías. Sin embargo, esto es interesante cuando modelamos otro tipo de procesos con zonas más extensas, donde quizás se deba hacer un hincapié en la limpieza o en la ampliación del área si es que este supone un retraso a los pacientes debido a su congestión.

Se muestra, a continuación, el mapa de calor asociado a nuestro proyecto del Servicio de Extracciones. Existen cinco tipos de colores, que van de menos a más congestión o circulación por esas zonas: azul oscuro, verde, amarillo, naranja y rojo.

En la *Figura 6.5* se muestra el mapa de calor del Servicio de Extracciones al inicio del proceso.



Figura 6.5: Mapa de calor del plano de planta (inicio)

En esa imagen se aprecia muy bien como con los pocos pacientes que han acudido ya al servicio, todos tienen que pasar por el kiosco y dirigirse a recepción, como no han andado aún por el resto de localizaciones, esa parte tiene una transitabilidad muy elevada.

En la *Figura 6.6*, sin embargo, se muestra el mapa de calor a media mañana, se aprecia que ya hay varios pacientes esperando para realizarse las curvas. Ya se aprecia como el mapa de calor está mayoritariamente en azul exceptuando la parte de kiosco, recepción y el pasillo de los boxes que, aunque a penas se visualice, están en un color más amarillento. La razón por la que el mapa sale en azul es porque al final las zonas se acaban equilibrando y prácticamente el mismo número de pacientes se distribuyen equitativamente en las localizaciones.

Se debe mencionar que el modelo no está validado, por lo que el mapa de calor mostrado, si

coincide con la realidad, es mera coincidencia.



Figura 6.6: Mapa de calor del plano de planta (media mañana)

## 6.6. Estadísticas

La representación de las llegadas de los pacientes se puede realizar de dos formas, bien en base a los datos de citaciones y programar las llegadas conforme a las citas o, en base los datos reales obteniendo las distribuciones estadísticas subyacentes de los datos de llegada registrados, con los retrasos y adelantos de los pacientes.

Las estadísticas obtenidas del modelo aportan valor a la simulación, nos permitirán, en un futuro, estudiar la viabilidad de las mejoras que se puedan incorporar al servicio. Todas las estadísticas se obtienen en tiempo real, podemos modificar el ritmo que queremos que tome la simulación, que se adapte al tiempo real, que se adelante o incluso que se ralentice.

Las estadísticas finales del modelo no forman parte de este TFG por motivos de alcance, sin embargo, se muestran unas estadísticas para visualizar los dashboards. Las estadísticas que figuran en las siguientes imágenes no tienen que ver con las reales. Serán una tarea futura cuando el modelo haya sido validado.

En la *Figura 6.7* se muestra el dashboard del personal que atiende en el Servicio de Extracciones.

La gráfica titulada como “Total personal” es una agrupación de los tiempos con su respectivo porcentaje en cada estado de todo el personal. Situando el cursor encima de cada color, nos indica el porcentaje correspondiente a ese estado, en este caso nos muestra que el 72.15 % del



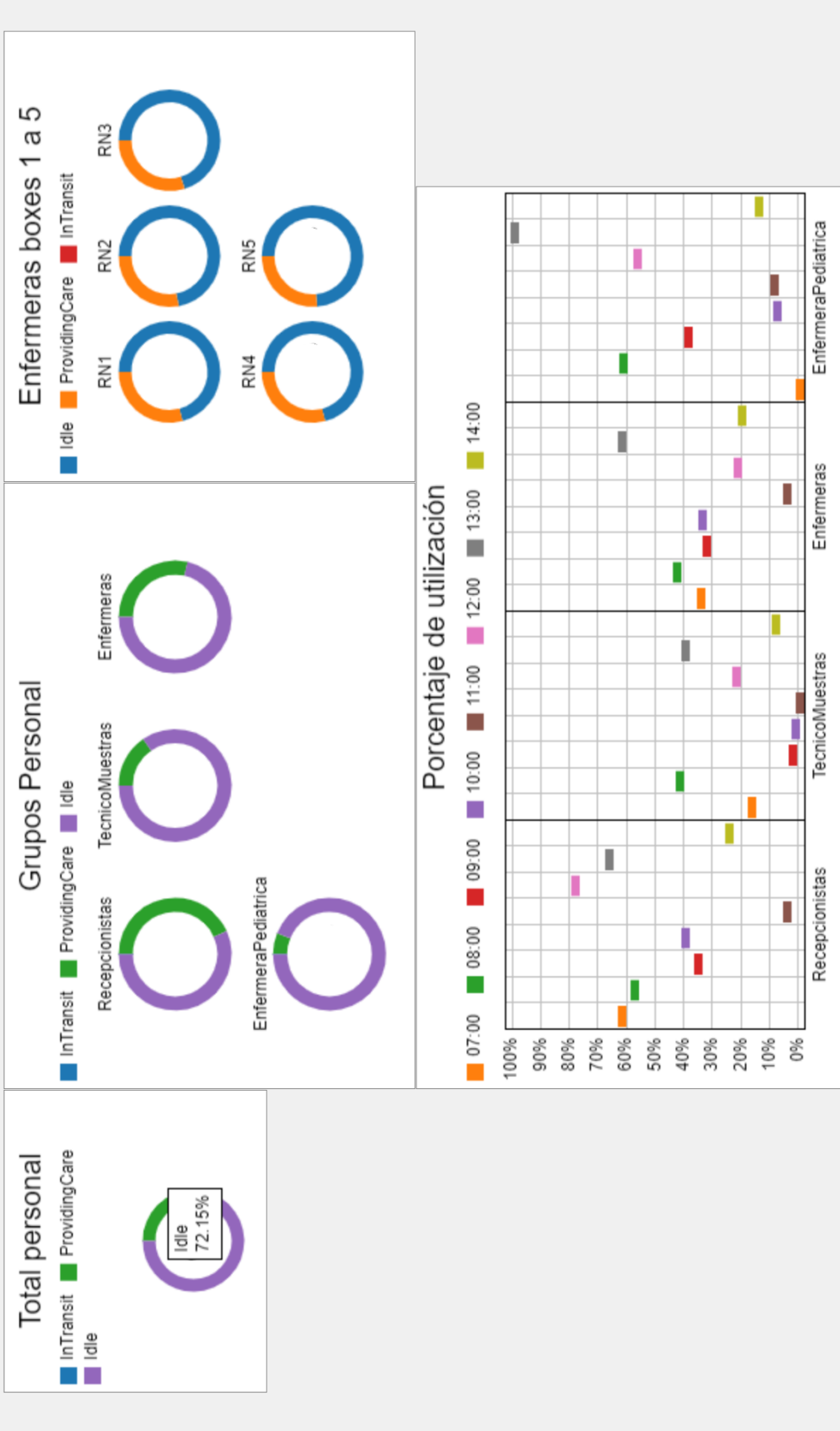


Figura 6.7: Dashboard personal

tiempo el personal ha estado libre. Difiere mucho de las estadísticas reales porque en este modelo aún no se han podido incorporar las horas de trabajo de cada box como vimos en el *Capítulo Caso de estudio Sección 5.1*. En este modelo se ha programado que todos los boxes atiendan el mismo tiempo: de 8:00 a 15:00.

Código de estados:

- idle: ocioso.
- ProvidingCare: atendiendo al paciente.
- inTransit: en tránsito (tiempo o porcentaje desplazándose).

En la gráfica nombrada “Grupos personal” se muestran las estadísticas agrupadas por grupos, cada grupo contiene los miembros vistos en la piscina de recursos en la *Sección 6.2* de este mismo capítulo. Por eso en este caso aunque las enfermeras y la enfermera pediátrica quizás sería lógico que perteneciesen al mismo grupo, se han programado de forma independiente para obtener las estadísticas por separado ya que la labor difiere.

La correspondiente a “Enfermeras boxes 1 a 5” muestra las estadísticas detalladas del grupo de enfermeras que atienden a los boxes 1 a 5 (es decir, no está incluida la enfermera pediátrica, que pertenece al box 6). Esta gráfica se puede obtener para cualquier grupo, podríamos haber obtenido la correspondiente a las recepcionistas (2 miembros).

En cuanto al “Porcentaje de utilización”, se muestra por grupos de personal, el porcentaje de utilización (ocupación) de los mismos en cada hora.

En la *Figura 6.8* se muestra el dashboard de los pacientes que acuden al Servicio de Extracciones. Estas estadísticas nos sirven tanto para comprender al paciente como para entender las posibles deficiencias del Servicio modelado.

En la gráfica “Tiempo de estancia”, como bien menciona el título, hace referencia al tiempo medio de estancia (en minutos) de un paciente en el servicio de extracciones. Esta estadística se puede ver penalizada por los pacientes que acuden a realizarse curvas, ya que estas pueden prolongarse hasta 5 horas y no representa el tiempo de atención medio (no de espera).

Este problema también se plantea en la gráfica del “Tiempo medio en estado” pues un paciente que se realice curvas, debe esperar 1h entre extracciones, por lo que en todo ese tiempo permanecerá “idle”, es decir, ocioso.

Una posible solución a esto se encuentra en separar los tipos de pacientes, donde supuestamente, se espera que un paciente que acude a realizarse una extracción o a entregar una muestra, no se prolongue mucho su estancia.

La asociada a “Distancia media recorrida” muestra la distancia media recorrida (en metros) en el servicio desde que entra el paciente hasta que abandona el lugar. Esta gráfica no nos muestra, sin embargo, el tiempo destinado a desplazarse. Sí lo hace la gráfica de “Tiempo medio en estado”.

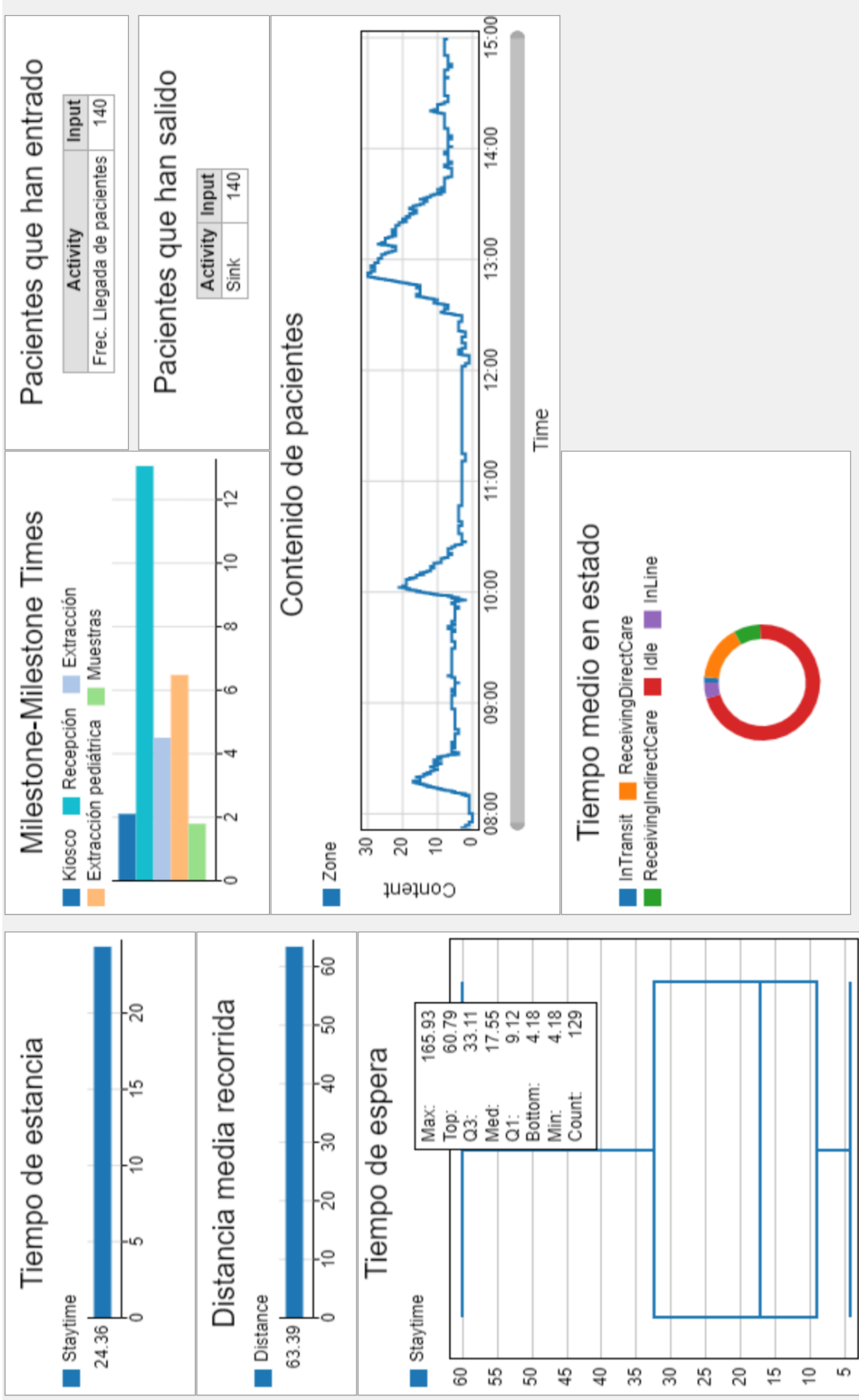


Figura 6.8: Dashboard pacientes

“Tiempo medio en espera” es un gráfico box-plot (diagrama de caja) en el que se muestran las medidas de la *Figura 6.9*. [36] En este caso el paciente que más tiempo ha estado en el servicio ha permanecido en este 165.93 minutos, mientras que el paciente más rápido ha sido de 4.29 minutos. La mediana ha sido de 17.55 minutos.

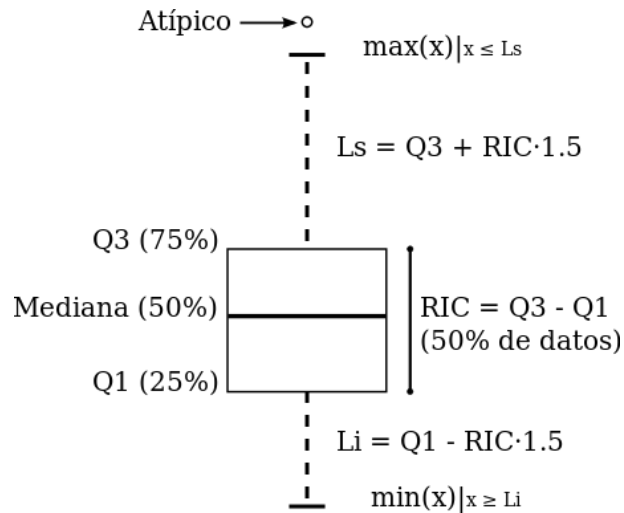


Figura 6.9: Diagrama de caja (BoxPlot)

La gráfica de “Tiempo medio en estado” muestra los porcentajes en función del tiempo consumido en cada estado, siendo estos:

- inTransit: en desplazamiento.
- ReceivingDirectCare: recibiendo atención sanitaria.
- ReceivingIndirectCare: recibiendo atención no sanitaria (recepción).
- idle: ocioso.
- inLine: en la cola de espera.

“Milestone-Milestone Times” indica los tiempos medidos entre hitos (milestones). En kiosco medimos el tiempo desde que llega al Servicio de Extracciones, espera a la cola del kiosco, interactúa con él y lo libera.

En Recepción, desde que libera el kiosco, es decir, recibe su número de cita, espera a ser atendido por recepción, lo atienden y libera recepción.

Lo que se muestra es el proceso asociado a cada parte. En extracciones, desde que espera a ser llamado por los boxes, hasta que le llaman y los abandona. De forma similar en extracción pediátrica y en muestras.

“Contenido de pacientes” muestra el número total de pacientes que se encuentran en el Servicio de Extracciones en cada momento. El modelo no está validado y las estadísticas no corresponden con la actualidad. En la realidad, a partir de las 11 no se suelen acumular pacientes, cuando hay una mayor acumulación es entre las 8 y las 11, más concretamente entre las 9:30 y las 10:30.

Las últimas dos gráficas que nos faltan por comentar son las de “Pacientes que han entrado” y “Pacientes que han salido”, de este modo, podemos saber el número de pacientes atendidos en este caso los que han entrado se corresponden con los que han salido por lo que no tendríamos pacientes sin atender.

Todas las estadísticas mostradas se pueden exportar a PNG, HTML o a CSV para su posterior análisis y/o visualización.

## 6.7. Experimentador (OptQuest)

El alcance de este TFG no nos permite modelar diferentes escenarios. FlexSim contiene una herramienta de optimización denominada OptQuest. Nos permite elegir entre los diferentes escenarios programados.

En la *Figura 6.10* se muestra un ejemplo de la ventana del experimentador, nos permite escoger entre las diferentes soluciones y nos proporciona, además, los mejores resultados. Esta imagen nada tiene que ver con nuestro modelo, ha obtenida de [37] como ejemplo ilustrativo.

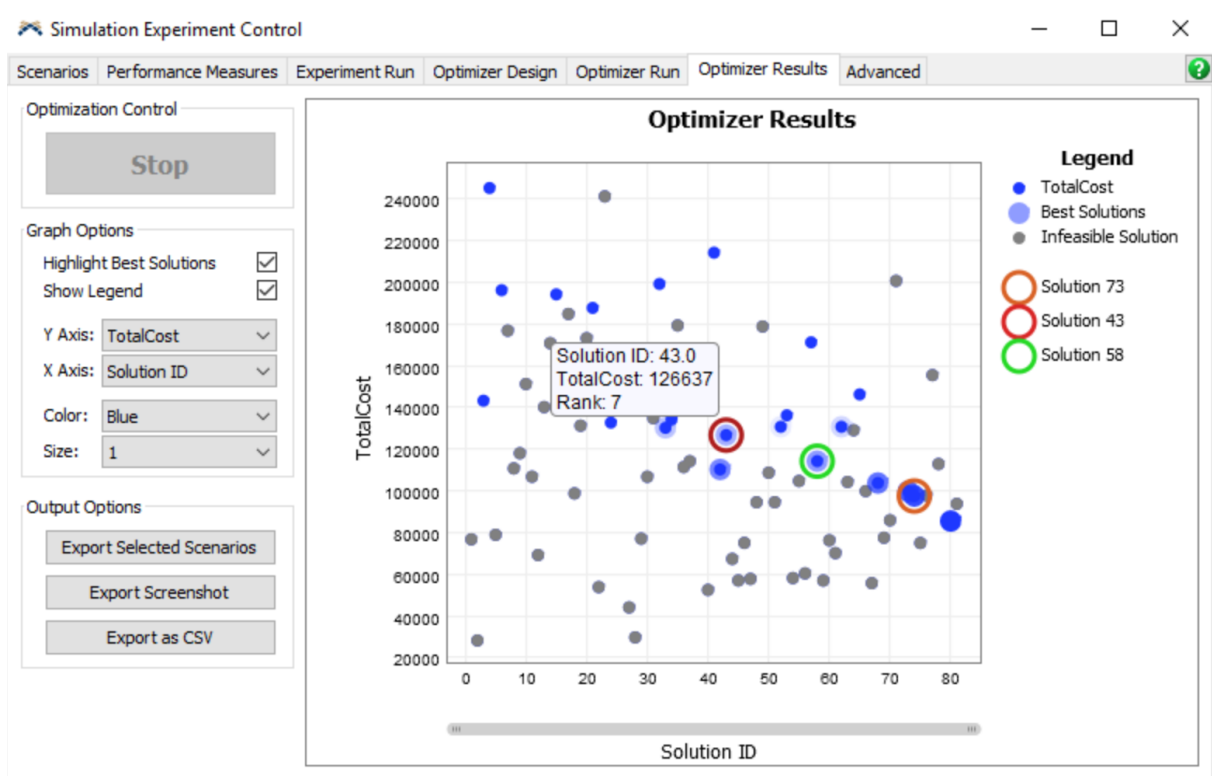


Figura 6.10: Experimentador (OptQuest)



# Capítulo 7

## Conclusiones

El proyecto desarrollado en este documento permite concluir que se han cumplido todos los objetivos planteados en este proyecto. Teniendo en cuenta todo lo aprendido durante los meses que se ha llevado a cabo este proyecto, quedo gratamente sorprendido por la amabilidad y profesionalidad de los trabajadores del HURH.

### 7.1. Trabajo realizado

En el presente documento se ha desarrollado un proyecto real modelando el Servicio de Extracciones perteneciente al HURH. Este proyecto nos ha permitido establecer, conocer y entender las fases que se deben seguir para el correcto desarrollo de un modelo de simulación válido y útil.

Ha sido necesario realizar una revisión sistemática para conocer el estado actual y la relevancia de la aplicación de eventos discretos en el sector sanitario. También ha sido imprescindible acudir a dicho servicio para aprender su funcionamiento así como aprender a manejar FlexSim.

Se han aplicado métodos estadísticos para el análisis de los datos de la revisión sistemática de la literatura, para el filtrado de la base de datos del Servicio de Extracciones así como el análisis de los datos que lo contienen.

La aleatoriedad ha sido el eje vertebrador de la modelización y la experimentación, no se debe modelar un proceso de forma similar pues sería una mera representación de la realidad que no aportaría valor y siempre conllevaría al mismo escenario.

La simulación se ha realizado en base a los eventos discretos, se ha descrito el funcionamiento del simulador FlexSim así como la construcción de un modelo desde cero.

## 7.2. Algunas reflexiones consideradas importantes

- La utilización de técnicas de simulación de eventos discretos en el sector sanitario permite obtener grandes mejoras de cara al paciente como la reducción de los tiempos de espera, reducción de los costes, reducción del tiempo de proceso, etc. De hecho, se ha realizado una extensa revisión sistemática de los eventos discretos en el sector sanitario y las mejoras conseguidas.

Tanto los pacientes como el personal sanitario se ven beneficiados en la aplicación de estas técnicas de simulación.

- El inconveniente que se puede ver en la utilización de una aplicación existente para la simulación de eventos discretos es el coste económico que su uso supone. Sin embargo, utilizar este tipo de aplicaciones se muestra como una buena opción para el correcto desarrollo de un sistema de simulación al contar con un soporte especializado y estar optimizada.
- Abordar la construcción de un gemelo digital, en particular, o el análisis de datos previo, así como aprender el funcionamiento de un servicio médico, o revisiones de la literatura existente del objeto de estudio, en general, en un idioma distinto al español supone un esfuerzo mayor.
- La utilización de un gemelo digital en el sector sanitario reduce notablemente el esfuerzo de desarrollo de nuevos protocolos actualizados a la demanda del presente. Como inconvenientes de la utilización de un gemelo digital radica en la poca o nula publicación de los modelos utilizados; y no solo de los aplicados en otros hospitales, sino en otras industrias. Esto es debido a la política de confidencialidad de la empresa.
- La construcción de un gemelo digital fuera de un programa específico de simulación como FlexSim, Arena, Simul8, Anylogic, ProModel, etc., haciendo uso de lenguajes como R tiene sentido únicamente si se trata más bien de un proyecto de investigación que se prolonga en el tiempo y con un extenso equipo de desarrolladores detrás. Crear un sistema de este tipo no es sencillo y la falta de transparencia conlleva una mayor dificultad añadida, además de la carencia de soporte y modelos, lo que implica tirarse de cabeza a una piscina sin conocer su contenido.

## 7.3. Trabajo futuro

- En primer lugar, el modelo debe ser validado. Es un requisito indispensable para seguir avanzando en la simulación y para la toma de decisiones. Una vez que este modelo quede validado, se puede pasar al siguiente paso, que es la experimentación con diferentes escenarios; los cuales, nos aportarán diferentes estadísticas y será labor nuestra su análisis junto con las propuestas de optimización del servicio. Finalmente, serán los responsables del servicio los que realicen la toma de decisiones de las propuestas de mejora.



- Este estudio ha abierto una nueva línea de investigación en el Hospital Universitario Río Hortega que será llevada a cabo por la Unidad de Logística y Procesos la cual se dedicará a la planificación, estudio, simulación y optimización de nuevos servicios en este hospital mediante la creación de gemelo digitales con FlexSim.
- El **Hospital Universitario Río Hortega de Valladolid** será **pionero** aplicando técnicas de simulación y optimización como las expuestas en este documento en otros servicios hospitalarios.
- La verificación y validación de los escenarios desarrollados forman parte del personal responsable del servicio y se desarrollarán como tarea futura. La metodología desarrollada permite que sean válidos y creíbles al ajustarse a la realidad del proceso.

## 7.4. Competencias

La simulación es una disciplina que permite representar, modelar, así como entender el comportamiento de sistemas complejos y predecir su comportamiento futuro. La simulación proporciona al desarrollador el conocimiento y las herramientas necesarias para la construcción de modelos complejos de simulación, mediante la utilización de lenguajes estándar así como el análisis previo de los datos de entrada, el diseño de los escenarios y el análisis final destinado a los resultados de la simulación para la toma de decisiones.

Para poder efectuar una simulación, el desarrollador debe tener una serie de competencias que considero que he trabajado en este TFG [38].

### 7.4.1. Competencias básicas

- Ser capaz de demostrar conocimiento, así como tener la capacidad de aplicación de los principios, metodologías y ciclos de vida de la Ingeniería del Software.
- Saber utilizar de forma apropiada teoremas, procedimientos y herramientas de la Ingeniería Informática en todos los aspectos (requisitos, análisis, diseño, desarrollo, pruebas, despliegue, mantenimiento) de manera que se plasme el conocimiento en el modelo.

### 7.4.2. Competencias específicas

- Valorar las necesidades del cliente, ser capaz de especificar los requisitos estableciendo unos compromisos aceptables dentro de la limitación del tiempo de desarrollo, implementación y despliegue, costes.
- Diseñar soluciones apropiadas a lo solicitado mediante técnicas de Ingeniería Informática respetando los aspectos sociales, legales, éticos y económicos.

- Ser capaz de mantener y evaluar el modelo de forma que cumpla las especificaciones con la calidad suficiente para el correcto funcionamiento de forma fiable y eficiente.

### **7.4.3. Competencias transversales**

#### **Razonamiento**

- Disponer de capacidad suficiente de razonamiento lógico, crítico, así como matemático. Ser capaz de resolver cuestiones dentro del área objeto de estudio.
- Tener capacidad de abstracción, es decir, evitar crear modelos que no reflejen la realidad.
- Ser capaz de analizar e interpretar los resultados de la simulación y, tener la habilidad de plasmarlos en un informe para su posterior estudio por parte del personal encargado del proceso simulado.

#### **Sostenibilidad y compromiso social**

- Comprender la complejidad de los costes económicos y sociales que del modelo.
- Tener en cuenta el impacto social y medioambiental que implican las soluciones del modelo.
- Valorar el derecho a la privacidad al aplicar soluciones.
- Llevar a cabo proyectos coherentes con la sostenibilidad y el desarrollo humano.

#### **Lengua extranjera**

- Manejar y comprender el inglés con soltura suficiente.
- Comprender y saber buscar información en inglés, idioma por excelencia internacional y liderado por la mayoría de las publicaciones.

## **7.5. Reflexión final**

A lo largo del desarrollo de este proyecto me he enfrentado a grandes dificultades de las que he conseguido salir adelante. El principal ha sido un problema de plazo, para validar el modelo se necesita tiempo, por lo que se deja como tarea futura que voy a seguir realizando en el HURH. Una vez validado el modelo procederemos a la experimentación, construyendo varios escenarios.

En este periodo he adquirido grandes competencias y habilidades, a su vez, se ha aprendido a realizar una revisión sistemática extensa y a simular procesos hospitalarios. Es muy importante antes de simular tener bien claro el funcionamiento de un servicio, ya que, la simulación debe ser una representación de la realidad.

Hemos visto el potencial que tiene la simulación de eventos discretos en el ámbito sanitario y su elevada aplicación en otros países. Se ha demostrado que el trabajo entre personal sanitario e ingenieros en un hospital es necesario. Los hospitales deben invertir más dinero en ingeniería, solo así, seguirán avanzando con la tecnología más puntera, de la que se beneficiarán tanto pacientes como empleados.



# Referencias

- [1] PolicyAdvice. The state of healthcare industry – statistics for 2021. URL <https://policyadvice.net/insurance/insights/healthcare-statistics>.
- [2] Ministerio de Sanidad. Secretaría General de Salud Digital. Información e Innovación del SNS S.G.Información Sanitaria. Sistema de información de listas de espera del sns (sisle-sns) rd 605/2003. URL <https://www.msbs.gob.es/estadEstudios/estadisticas/inforRecopilaciones/listaEspera.htm>.
- [3] Hospital universitario río hortega. URL <https://www.saludcastillayleon.es/HRHortega/es>.
- [4] Flexsim. URL <https://www.flexsim.com/es/>.
- [5] Comite de Título del Grado en Ingeniería Informática de la UVa. Trabajo de fin de grado: Guía del alumno. URL [https://www.inf.uva.es/wp-content/uploads/2013/01/00-GuiaAlumnoTFG\\_2017.pdf](https://www.inf.uva.es/wp-content/uploads/2013/01/00-GuiaAlumnoTFG_2017.pdf).
- [6] TutorialsPoint. Sdlc - waterfall model. URL [https://www.tutorialspoint.com/sdlc/sdlc\\_waterfall\\_model.htm](https://www.tutorialspoint.com/sdlc/sdlc_waterfall_model.htm).
- [7] Mike Cotterell and Bob Hughes. *Software project management, 5th Edition*. McGraw Hill Higher Education, 2009.
- [8] Retribuciones 2021 - sacyl. URL <https://www.saludcastillayleon.es/profesionales/fr/recursos-humanos/retribuciones-accion-social-compensaciones/retribuciones.fichiers/1855428-RETRIBUCIONES%20SACYL%202021%20%28WEB%29.pdf>.
- [9] Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado. Resolución de 27 de enero de 2020, de la dirección general de trabajo, por la que se registra y publica el acta de modificación del convenio colectivo de fertiberia, sa. URL [https://www.boe.es/eli/es/res/2020/01/27/\(2\)](https://www.boe.es/eli/es/res/2020/01/27/(2)).
- [10] Mikhail Benet Rodríguez, Zafra Sandra Liliana, and Sandra Patricia Quintero Ortega. La revisión sistemática de la literatura científica y la necesidad de visualizar los resultados de las investigaciones. *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 2015. ISSN 2145-549X. URL <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=517751487013>.

- [11] Cochrane. URL <https://www.cochrane.org>.
- [12] B. A. Kitchenham. Procedures for performing systematic reviews. *Keele University, UK*, 33 (2004):1–26, 2004. ISSN 1353-7776. URL [http://www.elizabete.com.br/rs/Tutorial\\_IHC\\_2012\\_files/Conceitos\\_RevisaoSistematica\\_kitchenham\\_2004.pdf](http://www.elizabete.com.br/rs/Tutorial_IHC_2012_files/Conceitos_RevisaoSistematica_kitchenham_2004.pdf).
- [13] B. A. Kitchenham and S. Charters. Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering (version 2.3). 2007. URL <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.117.471>.
- [14] B. A. Kitchenham, O. Pearl Bereton, D. Budgen, M. Turner, J. Bailey, and S. Linkman. Systematic literature reviews in software engineering—a systematic literature review. *Information and software technology*, 51(1):7–15, 2009. doi: 10.1016/j.infsof.2008.09.009.
- [15] B. A. Kitchenham and Pearl Bereton. A systematic review of systematic review process research in software engineering. *Information and software technology*, 55(12):2049–2075, 2013. doi: 10.1016/j.infsof.2013.07.010.
- [16] Bases de datos csic: Icyt, isoc, ime. herramienta de difusión de la ciencia española. URL <http://digital.csic.es/handle/10261/5870>.
- [17] D. Moher, D. J. Cook, S. Eastwood, I. Olkin, D. Rennie, and D. F. Stroup. Improving the quality of reports of meta-analyses of randomised controlled trials: the quorum statement. *Oncology Research and Treatment*, 354(9193):1986–1900, 2000. doi: 10.1016/s0140-6736(99)04149-5.
- [18] J. LeLorier, G. Gregoire, A. Benhaddad, J. Lapierre, and F. Derderian. Discrepancies between meta-analyses and subsequent large randomized, controlled trials. *New England Journal of Medicine*, 337(8):536–542, 1997. doi: 10.1056/NEJM199708213370806.
- [19] H. Bastian, P. Glasziou, and I. Chalmers. Seventy-five trials and eleven systematic reviews a day: how will we ever keep up? *PLoS med*, 7(9):536–542, 2010. doi: 10.1371/journal.pmed.1000326.
- [20] MJ. Page, JE. McKenzie, PM. Bossuyt, I. Boutron, TC. Hoffmann, CD. Mulrow, and et al. The prisma 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, 2021. doi: 10.1136/bmj.n160.
- [21] Prisma 2020 checklist, . URL [http://prisma-statement.org/documents/PRISMA\\_2020\\_checklist.pdf](http://prisma-statement.org/documents/PRISMA_2020_checklist.pdf).
- [22] Prisma 2020 flow diagram for new systematic reviews which included searches of databases and registers only, . URL [http://prisma-statement.org/documents/PRISMA\\_2020\\_flow\\_diagram\\_new\\_SRs\\_v1.docx](http://prisma-statement.org/documents/PRISMA_2020_flow_diagram_new_SRs_v1.docx).
- [23] Revista Española de Salud Pública. Normas de publicación. URL [https://www.mscbs.gob.es/biblioPublic/publicaciones/recursos\\_propios/resp/revista\\_cdrom/misc/normas.pdf](https://www.mscbs.gob.es/biblioPublic/publicaciones/recursos_propios/resp/revista_cdrom/misc/normas.pdf).

- [24] M. M. Günal and M. Pidd. Discrete event simulation for performance modelling in health care: a review of the literature. *Journal of Simulation*, 4(1):42–51, 2010. doi: 10.1057/jos.2009.25.
- [25] M. Gul and A. F. Guneri. A comprehensive review of emergency department simulation applications for normal and disaster conditions. *Computers & Industrial Engineering*, 83: 327–344, 2015. doi: 10.1016/j.cie.2015.02.018.
- [26] Vosviewer. URL <http://www.vosviewer.com>.
- [27] N. J. Van Eck and L. Waltman. Software survey: Vosviewer, a computer program for bibliometric mapping. *scientometrics*, 84(2):523–538, 2010. doi: 10.1007/s11192-009-0146-3.
- [28] Universidad Carlos III de Madrid. Literatura gris. URL <https://rcm-upr.libguides.com/c.php?g=834296&p=6001829#>.
- [29] Robert B. Fetter and John D. Thompson. The simulation of hospital systems. *Operations Research*, 13(5):689–711, 1965. doi: 10.1287/opre.13.5.689.
- [30] S. C. Aggarwal and E. F. Stafford. A simulation study to identify important design parameters of a typical outpatient health system and to analyze measures of its performance. *In Proceedings of the 1976 summer computer simulation conference*, pages 544–553, 1976. ISSN 0952-6862 (Print) and 0952-6862.
- [31] Eric Hamrock, Kerrie Paige, Jennifer Parks, James Scheulen, and Scott Levin. Discrete event simulation for healthcare organizations: a tool for decision making. *Journal of Healthcare Management*, 58(2):110–124, 2013.
- [32] El Norte de Castilla. El río hortega, un hospital con sello de alta calidad. URL <https://www.elnortedecastilla.es/valladolid/hortega-hospital-sello-20190306123633-nt.html>.
- [33] Agencia Española de Protección de Datos. Orientaciones y garantías en los procedimientos de anonimización de datos personales. URL <https://www.aepd.es/sites/default/files/2019-12/guia-orientaciones-procedimientos-anonimizacion.pdf>.
- [34] Grupo Ático34. Guía sobre la privacidad digital. URL <https://protecciondatos-lopd.com/empresas/privacidad-digital/>.
- [35] Javier Tovar EFE Salud. Medir la rapidez al caminar anticipa discapacidades en mayores de 70 años. URL <https://www.efesalud.com/medir-la-rapidez-al-caminar-anticipa-discapacidades-en-mayores-de-70-anos/>.
- [36] Manuel Rodríguez. Interpretación de los gráficos de caja en el análisis descriptivo e inferencial. URL <https://www.qvision.es/blogs/manuel-rodriguez/2015/03/30/interpretacion-de-los-graficos-de-caja-en-el-analisis-descriptivo-e-inferencial/>.
- [37] FlexSim. Optquest - simulation optimization. URL <https://www.flexsim.com/es/optquest/>.

- [38] Universidad Polit cnica de Catalunya. Simulación. URL <https://www.fib.upc.edu/es/estudios/grados/grado-en-ingenieria-informatica/plan-de-estudios/asignaturas/SIM>.
- [39] Flexsim healthcare tutorial. URL <https://docs.flexsim.com/en/21.1/Tutorials/FlexSimHC/OverviewFlexSimHC/>.



# Apéndices



## Apéndice A

# Repositorio

Todo el código desarrollado a partir de las librerías de FlexSim para la construcción del gemelo digital, así como de R para la programación de las gráficas consta en la documentación de este TFG y en el repositorio: [https://github.com/christianberruezo/TFG\\_informatica](https://github.com/christianberruezo/TFG_informatica)



# Apéndice B

## Manual FlexSim

En el presente apéndice se explica de forma detallada el proceso para la construcción de un modelo digital mediante el uso de FlexSim. Es conveniente seguir el proceso detallado por orden, de principio a fin para que la creación del modelo sea la correcta.

### B.1. Licencias

Al iniciar FlexSim nos encontraremos una ventana inicial como la siguiente:

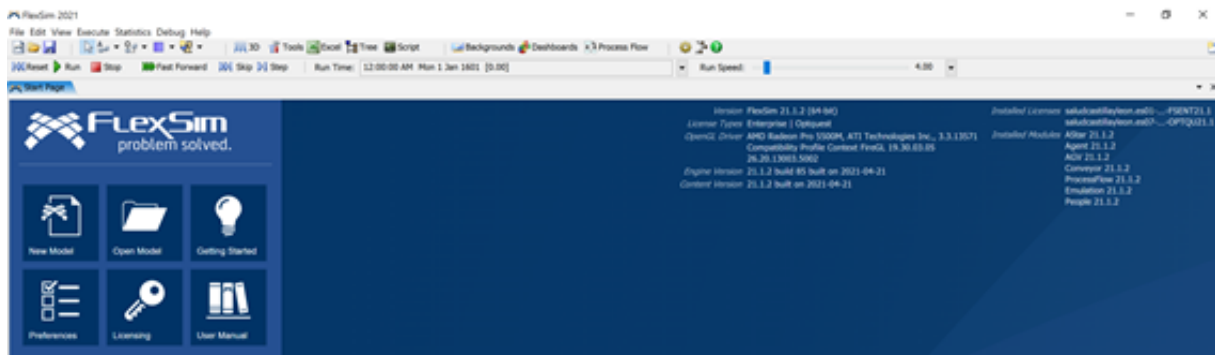


Figura B.1: Ventana inicial FlexSim)

A la derecha se especifican las licencias instaladas, como se puede ver en la siguiente imagen.

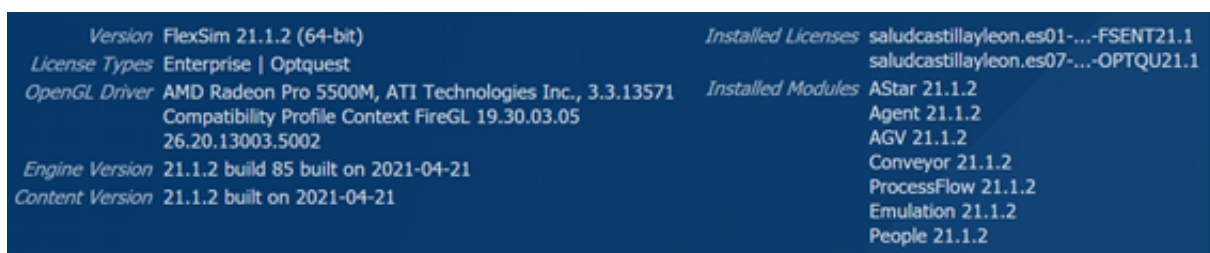


Figura B.2: Licencia FlexSim

Para poder instalar las licencias de las que dispongamos debemos seguir el siguiente proceso. Acudimos a la pestaña *Help – License Activation* y nos aparecerá la siguiente ventana:

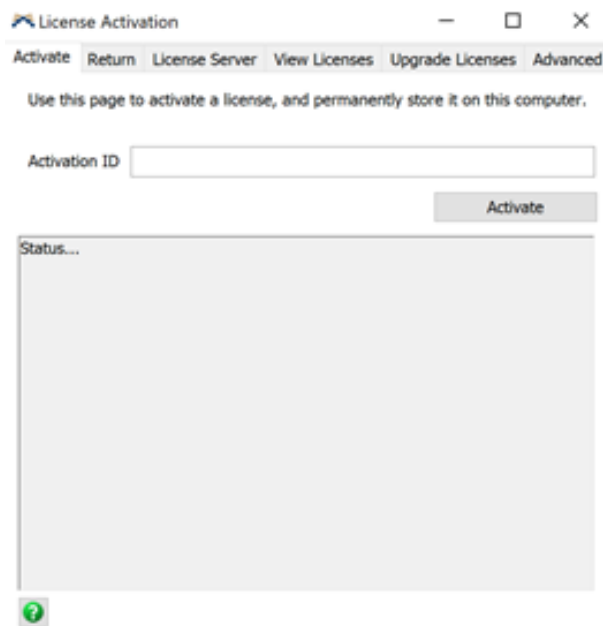


Figura B.3: Instalar licencia FlexSim

En esa ventana podemos añadir nuevas licencias, copiaremos el código de la licencia en el campo *Activation ID* y posteriormente pinchamos en *Activate*. La licencia de ExpertFit se activa de forma idéntica a la de FlexSim.

La licencia solo puede estar instalada en un único ordenador por lo que para que otra persona haga uso de ella debemos eliminarla del ordenador y activarla en el otro. Para poder hacer esto vamos a la pestaña *Return*:

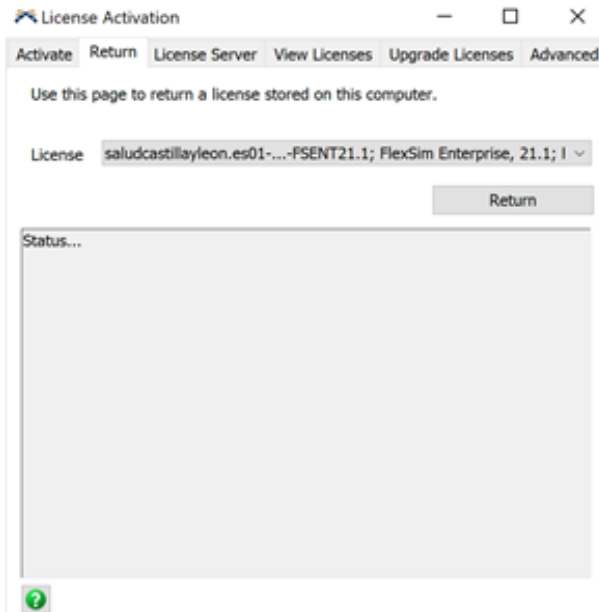


Figura B.4: Devolver licencia FlexSim

Cuando FlexSim lanza una nueva versión de dicho software es necesario actualizar la licencia de la que disponemos. Para ello nos dirigimos a la pestaña “*Upgrade Licenses*” y le damos a “*Request Upgrades*”.

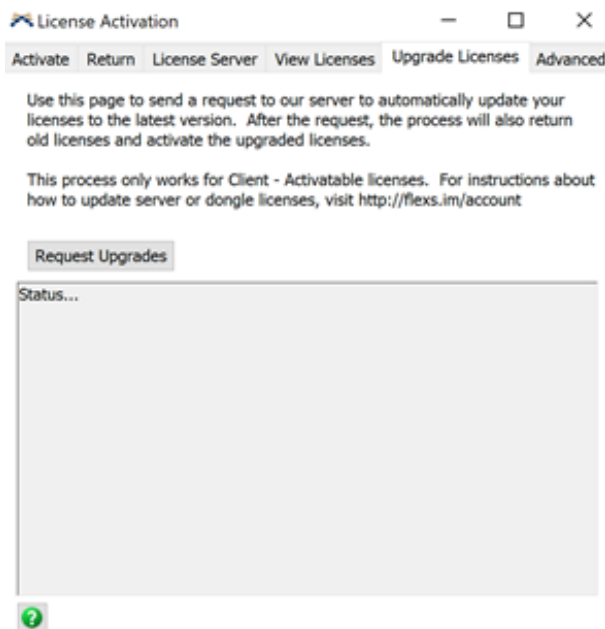


Figura B.5: Actualizar licencia FlexSim

FlexSim nos avisará cuando hay una nueva versión cuando aparezca un triángulo amarillo de advertencia donde se detalla la versión instalada.

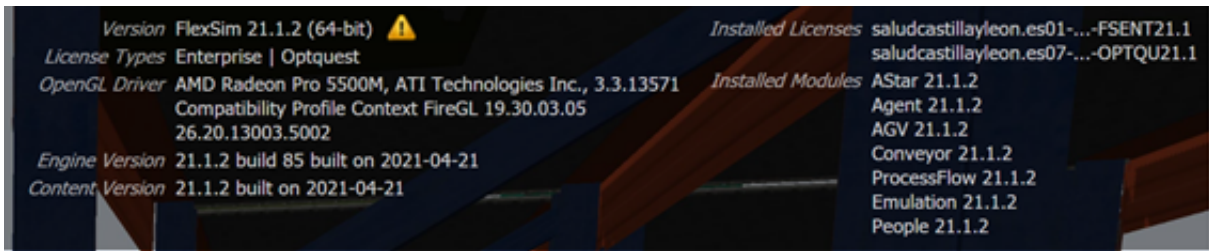


Figura B.6: Detalle instalación FlexSim

Situando el cursor encima de dicho triángulo se nos permite la opción de actualizar la licencia de una forma más sencilla.

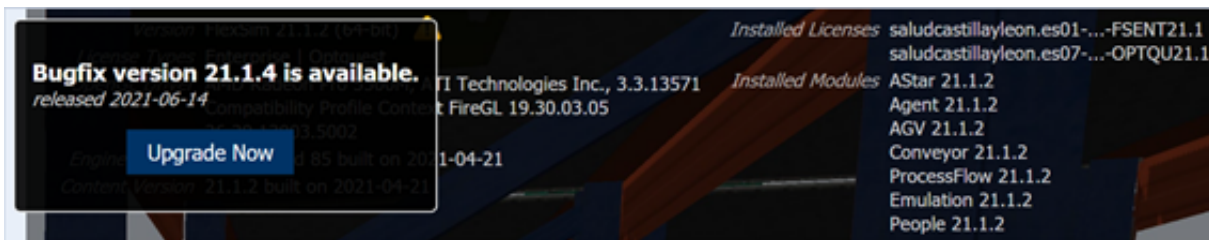


Figura B.7: Aviso FlexSim

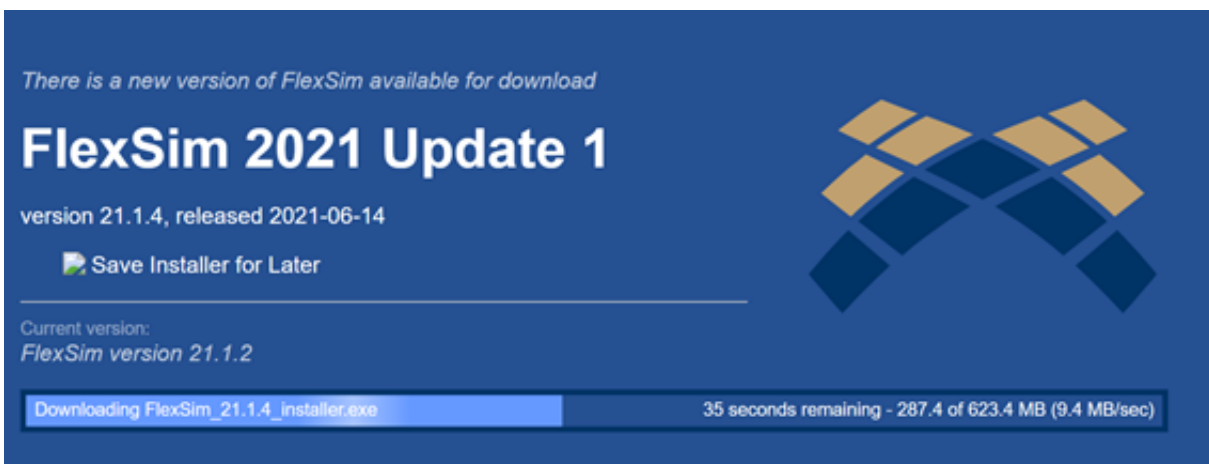


Figura B.8: Actualización FlexSim

## B.2. Entorno HealthCare

Para poder pasar a este entorno debemos pulsar sobre el siguiente icono y nos aparecerá un botón en el que pone Healthcare. Lo pulsamos.

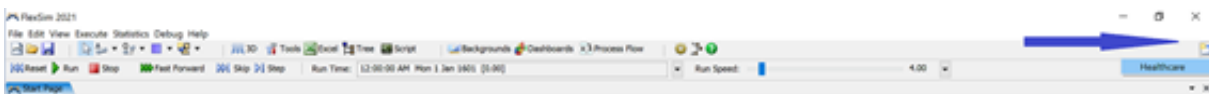


Figura B.9: Barra de herramientas FlexSim



Se nos mostrará ahora un entorno totalmente diferente:

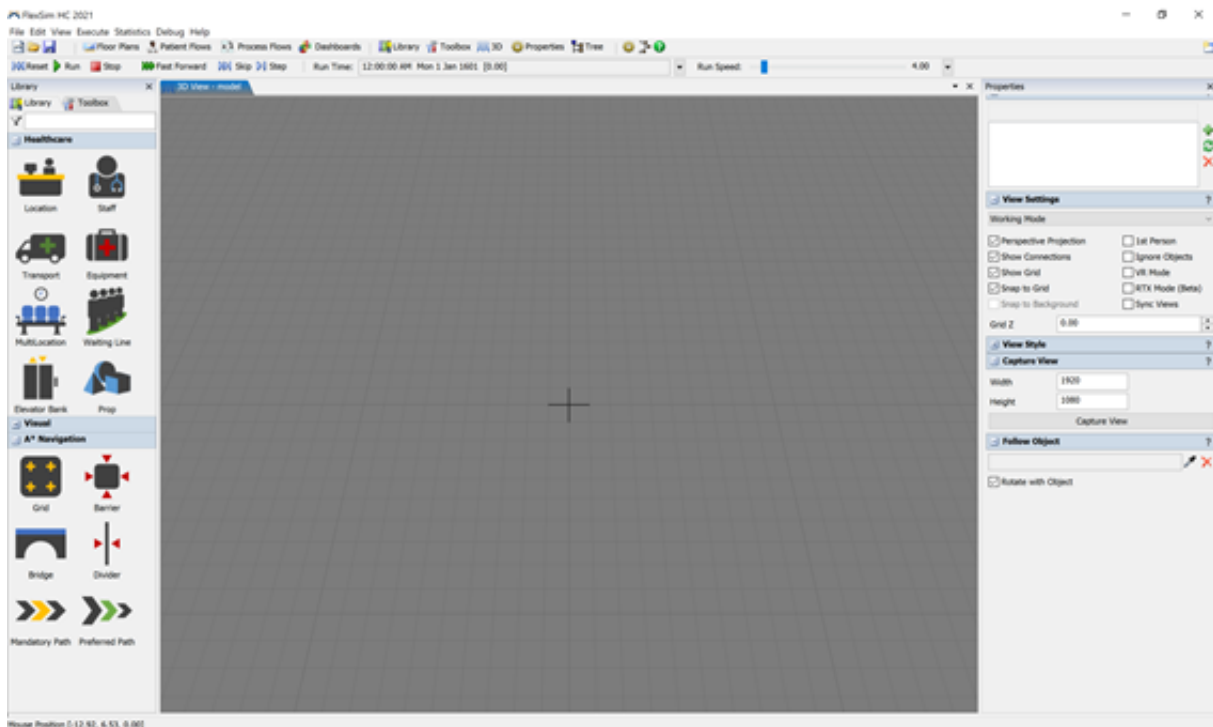


Figura B.10: Entorno HealthCare FlexSim

## B.3. Construcción del modelo

### B.3.1. Primeros pasos con FlexSim

Creamos un nuevo modelo. También se puede hacer en *File, New Model*.

Se nos abrirá esta ventana al crear un nuevo modelo. Es muy importante tener claro las medidas que se van a utilizar, de lo contrario deberemos crear un modelo nuevo o ponderar.

Solamente se puede modificar a posteriori tanto la hora de inicio del modelo como la fecha.

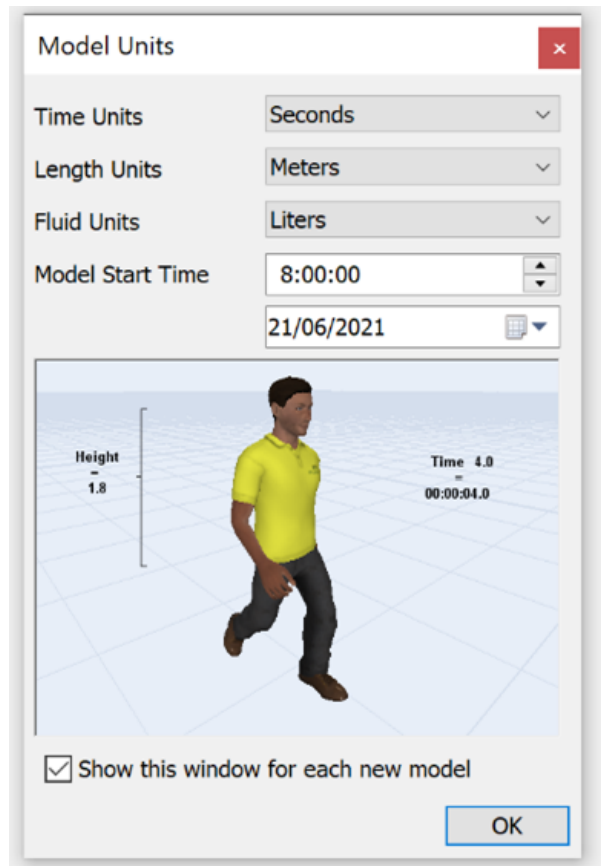


Figura B.11: Nuevo modelo FlexSim

### B.3.2. Run Time

*Run Time* es el tiempo del modelo, la hora a la que se está simulando.

*Run Speed* es la velocidad a la que queremos que se nos muestre la simulación.

Podemos personalizar el intervalo que queremos que dure la simulación.

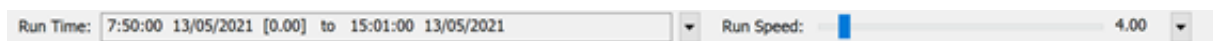


Figura B.12: Run Time

### B.3.3. Añadir un plano al modelo

El plano debe estar en formato *AutoCad* y es recomendable que se encuentre en las mismas unidades que se van a considerar en el modelo.

En este caso tenemos el plano de un servicio de extracciones. El nombre del plano por tanto es Extracciones. En *Browse* importamos el plano en formato *AutoCad*.

- La primera fila de X Y Z hace referencia a la posición que va a ocupar el plano en el mapa

del proyecto.

- La segunda línea es la rotación por si queremos situar el plano con un ángulo diferente.
- La tercera y última fila hace referencia a las unidades del modelo, como en nuestro caso el modelo se creó inicialmente en metros y el plano estaba en centímetros, tuvimos que multiplicar por 10.

En el caso de la Z es el propiamente eje Z (altura del plano sobre el lienzo) y es relevante cuando se modelan 2 servicios a diferente altura (en diferentes plantas). Sino es innecesario poner algo. En ocasiones podemos sufrir un fallo del programa y que el plano que hemos importado no se muestre. En ese caso en ese campo de la Z con poner un valor superior a 0.0 sirve para que el plano aparezca en el proyecto.

Con *Measure Convert* podemos medir distancias en el plano, nos sirve para comprobar.

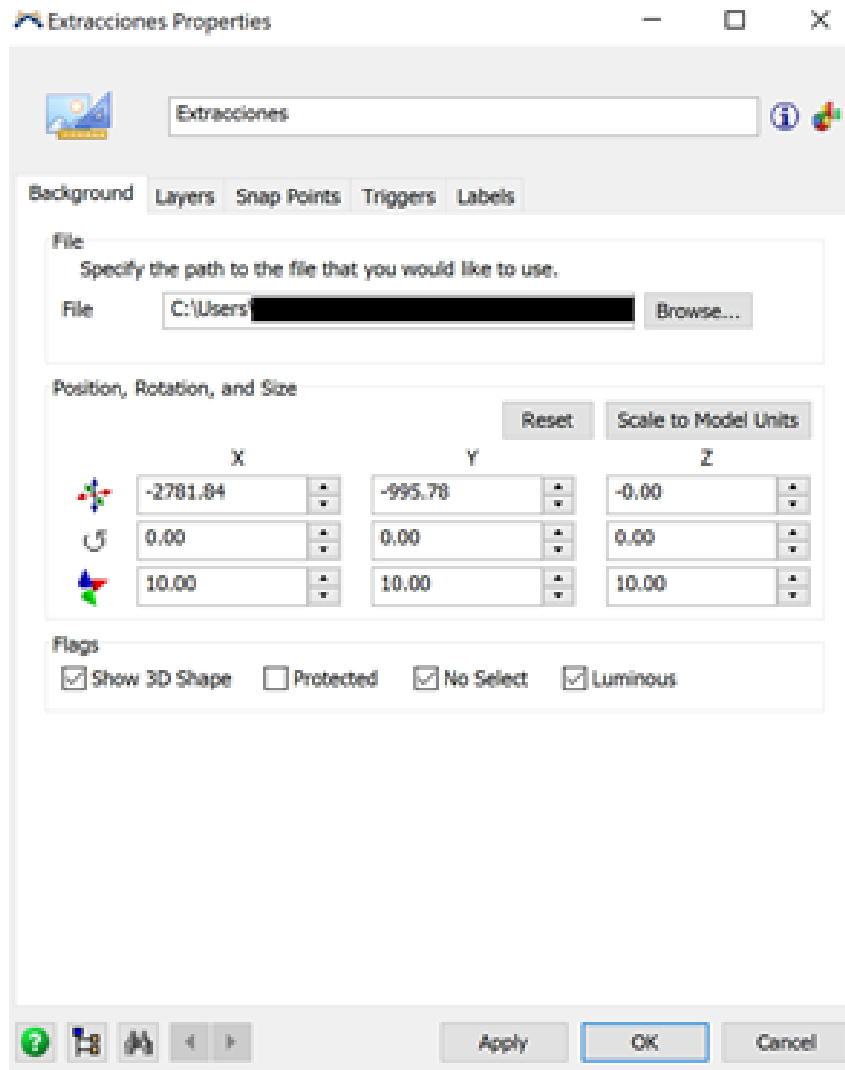


Figura B.13: Añadir un plano al modelo

### B.3.4. Levantamiento del 3D

En este apartado se detalla como construir las paredes, colocar las ventanas y el funcionamiento de los diferentes tipos de objetos.

Lo primero es levantar las paredes. Para ello nos dirigimos a *Library – Visual*, donde encontraremos las dos opciones de la *Figura B.14*, pulsamos sobre Walls (paredes) y comenzamos a dibujarlas en el plano. Deben representar estrictamente la realidad. No se deben poner paredes donde hay biombos u otros separadores.

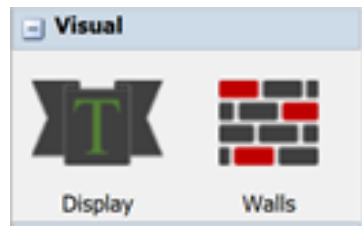


Figura B.14: Visual paredes

Si seleccionamos la pared se nos mostrarán sus propiedades. En ellas podemos modificar el tamaño de las paredes (altura y anchura) así como el color y la textura (si la tenemos); como se puede ver en la *Figura B.15*.

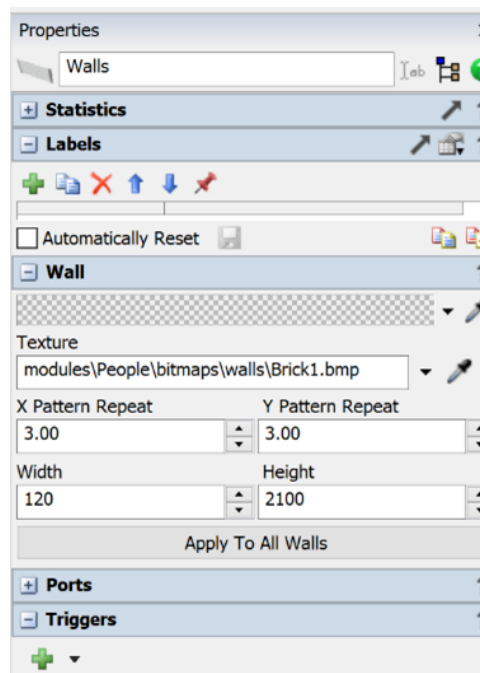


Figura B.15: Propiedades de paredes

Podemos además añadir ventanas al modelo para hacerlo más realista, las cuales tienen las mismas propiedades que los objetos de tipo *Walls* (paredes).

Las ventanas y demás objetos *Prop* no representan recursos, esto quiere decir que de por sí estos recursos no tienen ninguna finalidad en la simulación. Únicamente son objetos estéticos.

Las Figuras B.16 y B.17 muestran como queda el plano una vez que se le ha ajustado la altura de las paredes.

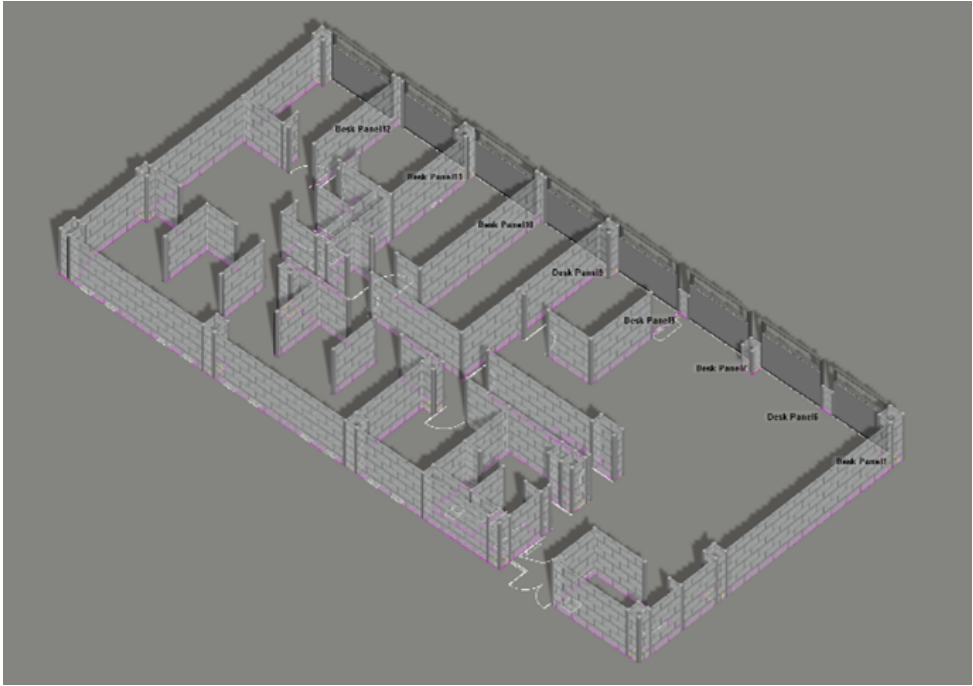


Figura B.16: Visualización del plano en el modelo



Figura B.17: Visualización del plano en el modelo (vista TOP)

### B.3.5. A\* Navigation

A\* nos permite introducir la lógica que modela la movilidad de los distintos tipos de personas en la simulación. Para introducirlo en el modelo podemos seleccionar cualquiera de las 6 opciones disponibles, si A\* no estaba introducido en el modelo, estas lo añadirán.

- *Grid*: cuadrícula (debe contener el plano del proyecto, conviene hacerlo algo más grande pero nunca puede haber zonas del plano no incluidas en el A\* Navigation).
- *Barrier*: barrera. (En la pantalla de A\* Navigator properties en la pestaña *Barrier Conditions* configuramos la batería de reglas para determinar zonas de uso restringido del personal dentro del *Grid* (como si fuesen puertas selectivas) para que posteriormente puedan ser utilizadas en los objetos *barrier* que podemos ir introduciendo al modelo.
- *Bridge*.
- *Divider*: crea un acceso condicionado, se suele situar encima de una puerta.

Si eres personal sanitario puedes pasar, si eres paciente no. De este modo se puede modelar quien entra en qué zonas.

- *Mandatory Path*: camino obligatorio.
- *Preferred Path*: camino preferido.

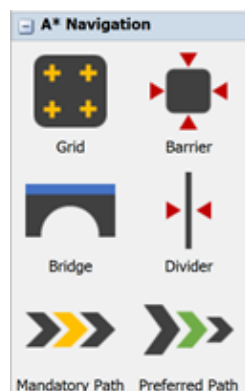


Figura B.18: A\* Navigation - panel de opciones

La cuadrícula azul de la *Figura B.18* es el *Grid* del A\* Navigation.

Es muy importante la generación de rutas es necesaria para definir por donde viajan en el modelo el *staff* y los pacientes, ya que de no configurarse siempre irían por el camino más corto incluso a través de los obstáculos del modelo.

En la ventana de *A\* Navigator properties*, es donde tenemos que definir que objetos viajan y que objetos son los obstáculos. En su pestaña *Setup* nos encontramos:

- *All Members*: Todos los miembros *Traveler Members*: Quienes viajan (*Staff*), podemos añadir uno a uno o por grupos. Hay que tener en cuenta que los pacientes también serán *traveler members*, pero estos al considerarse *Item* se añaden al algoritmo de navegación a través del *Process Flow*.

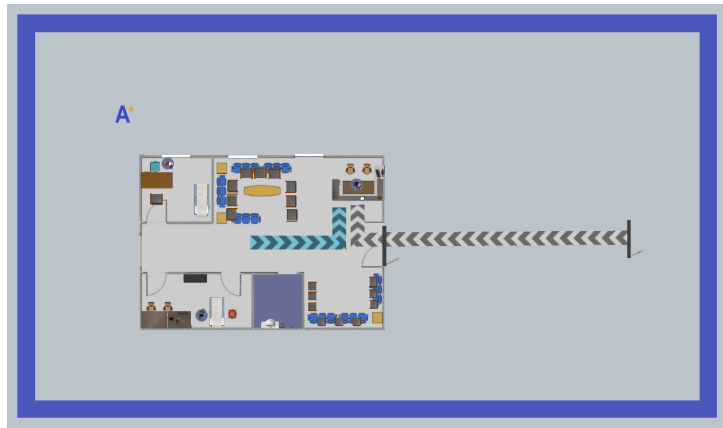


Figura B.19: A\* Navigation

- *FR Members*: Son los obstaculos, los añadimos con el gotero o a través del +. Importante señalar en la pestaña Visual el *flag*.
- "Show heat map", a través del cual podemos visualizar las zonas calientes de los travelers, como si fuese un *spagetti flow*. Indicar que la opción del desplegable transversal *per time* significa reservas de nodo por unidad de tiempo.

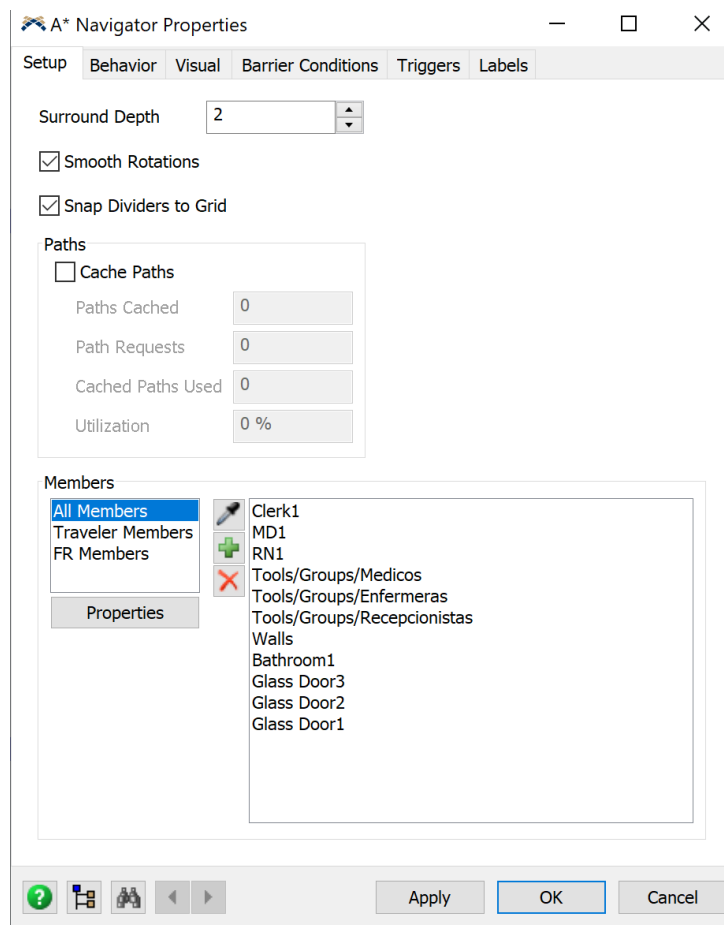


Figura B.20: A\* Navigator properties

### B.3.6. Recursos

En este apartado se presentan los distintos recursos de los que dispone FlexSim para el modelado. En *Location* encontramos los recursos a utilizar. Estos recursos se modelan.

Cualquiera de las formas que existen se las puede cambiar la estética si no se asemejan a la realidad. Debemos situar los recursos como se encuentran en la realidad.

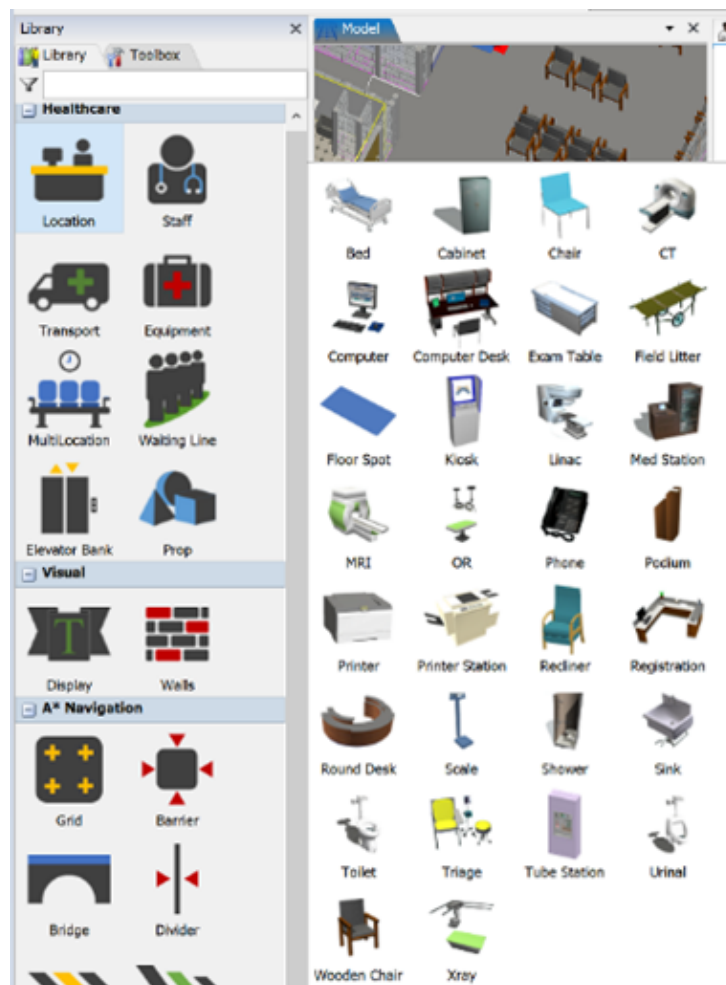


Figura B.21: Recursos de tipo localización (Location)

En *Staff* (personal) encontramos los diferentes roles de los sanitarios.





Figura B.22: Recursos de tipo personal (Staff)

En *Multilocation* encontramos las salas de espera y en *Waiting Line* la cola de espera. Las salas de espera pueden modificarse para que tengan la misma capacidad que en la realidad. Activamos *Edit Mode* para poder poner la capacidad que nos interesa. Luego lo desmarcamos. *Acquire As Single Unit* quiere decir que solo se puede usar una silla.

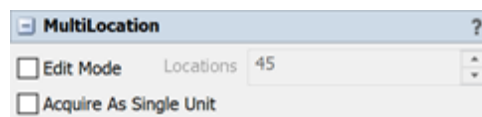


Figura B.23: Recursos Multilocation

### B.3.7. Creación de piscinas de recursos / grupos

Las piscinas de recursos son grupos de personas u objetos que tienen en común ciertas propiedades. Se pueden crear en *Toolbox - Groups - click derecho - Add group* - escogemos el grupo que queremos.

Una buena práctica de programación es crear grupos aunque actualmente solo haya una enfermera, por poner un ejemplo. Ya que a lo largo del modelo será más sencillo añadir más personal al no tener que modificar el diagrama de flujo, ya que estará añadido al grupo. Solo faltaría añadir el nuevo personal al grupo.

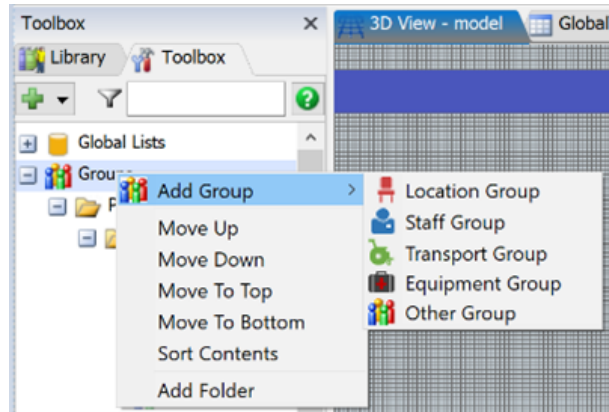


Figura B.24: Añadir grupos

El resultado será de la siguiente forma:

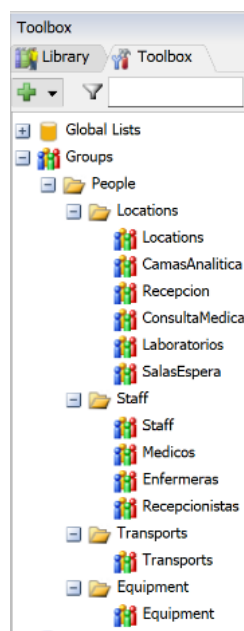


Figura B.25: Toolbox

Se puede modificar la asignación del personal a los pacientes. *Group Rank* quiere decir que, por ejemplo, de 2 médicos siempre elige primero el que está libre. Es todo lo contrario a *utilization*, este último equilibra las atenciones.

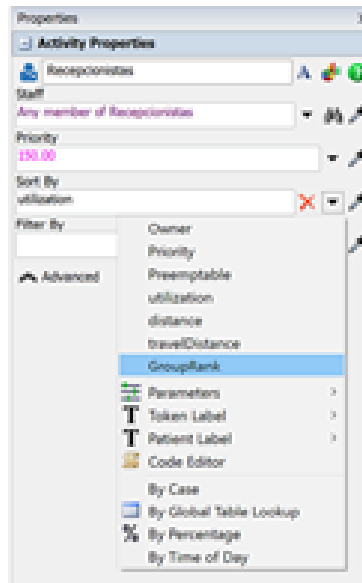


Figura B.26: Propiedades de los grupos

## B.4. Lógica del modelo

### B.4.1. Diagrama de flujo de pacientes

El botón de la *Figura B.27* nos sirve para crear un flujograma o diagrama de flujo de los pacientes.

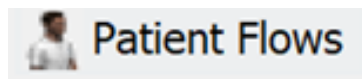


Figura B.27: Patient Flows

Nos encontramos ante dos posibles vías para su desarrollo, queda a elección del programador escoger la que le resulte más sencilla o adecuada para el modelo.

- Opción 1: Crear un diagrama de flujo único para cada tipo de paciente (depuración sencilla y visualmente sencillo de entender).
- Opción 2: Crear un único diagrama de flujo con todos los tipos de pacientes (depuración más compleja, visualmente dificultoso de entender, pero proporciona una visualización rápida en busca de errores).

En *Library* encontramos los siguientes bloques preprogramados pero fácilmente editables.

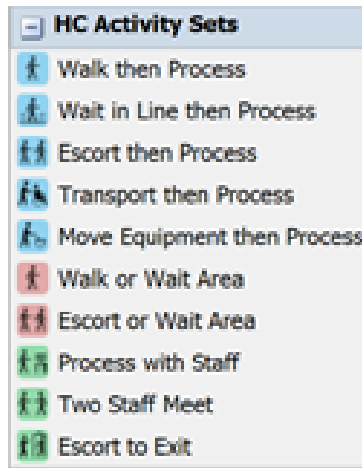


Figura B.28: HC Activity Sets

Estos recursos ya no están preprogramados, nos sirve para programar a nosotros el flujo.

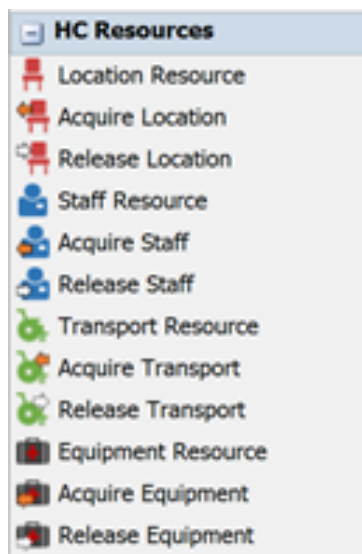


Figura B.29: HC Resources

Existen muchas más herramientas, esto viene muy bien explicado en [39].

Conviene destacar el recuadro de *Max Wait Timer*, al poner tiempo 0.0 lo que se hace es una comprobación instantánea del recurso. Si el recurso está ocupado el paciente va a la sala de espera (hay que modelarlo). Si no marcamos *Max Wait Timer* el paciente se quedará esperando en el último lugar adquirido.

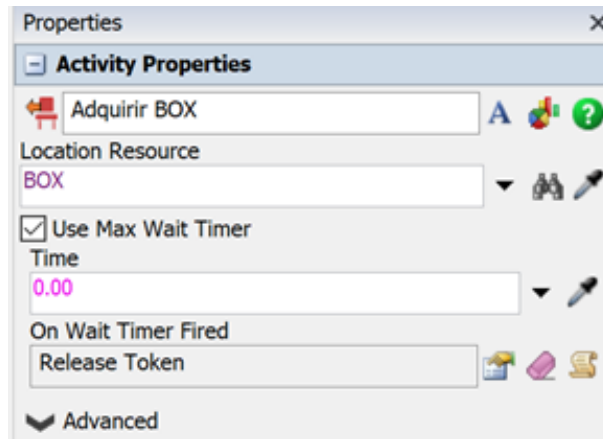


Figura B.30: Properties

#### B.4.2. Flujos de pacientes (llegadas/arrivals)

A continuación, vamos a ver los *Arrivals*, es la lógica que crea los pacientes.

Se pueden distinguir varias opciones, en primera instancia debemos crear un diagrama que represente las llegadas, para ello vamos a la carpeta *Arrivals* y lo creamos. Este diagrama es único y exclusivo para modelar las llegadas de los pacientes. Debemos realizar un análisis estadístico de estas para poderlas representar antes de comenzar la simulación si es que no disponemos de los datos o no están especificados.

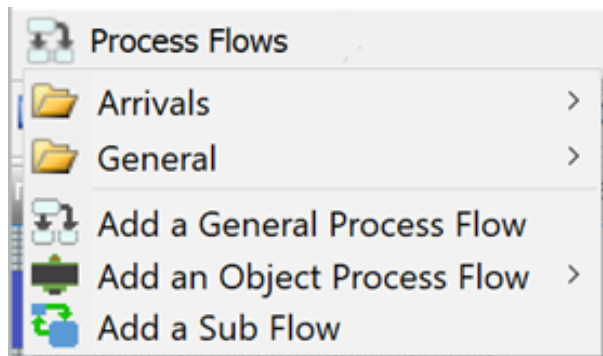


Figura B.31: Añadir un Process Flow

Distinguimos varios tipos de llegadas:

- *Inter-Arrival Source*: modela las llegadas entre pacientes (no puede ser negativas: no se adelantan los pacientes).
- *Schedule Source*: llegada de pacientes según el tiempo de FlexSim.
- *Date Time Source*: sirve para modelar las citas de los pacientes en base al día, hora y número de pacientes.
- *Event-Triggered Source*: llegadas según un evento.

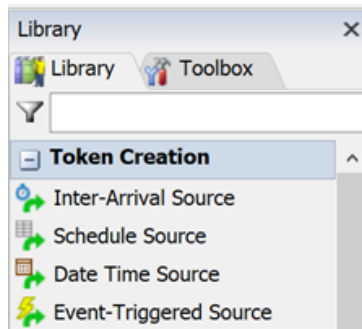


Figura B.32: Library

**Importante:** si las llegadas de los pacientes se ajustan mediante una distribución estadística hay que revisar las unidades del modelo y de la distribución. En el caso en el que no coincidan habrá que ponderar.

### B.4.3. Otros recursos

- *Assign labels:* creación de labels para programar tipos de pacientes, prioridades, etc.
- *Delay:* retraso (tiempo especificado).
- *Custom code:* bloque de programación.
- *Decide:* decisor, elige por dónde va el token.
- *Milestone:* hitos, se registra cada vez que se llega a ellos.

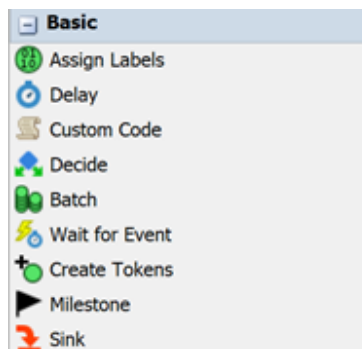


Figura B.33: Otros recursos

## B.5. Estadísticas / dashboards

### B.5.1. Zonas/Zone

En *Process Flows – Add a General Process Flow* añadimos un diagrama General. Este no modela las llegadas de los pacientes, sino el comportamiento de los pacientes en *Zone* (zonas). Sirve única y exclusivamente para obtener las estadísticas de los pacientes en estas zonas.

Es relevante en el caso de que queramos llevar a cabo un modelado más complejo y detallado como por ejemplo el comportamiento de los pacientes según su tipología en la sala de espera (no modela tiempos, esos se modelan por prioridad en el caso de que un paciente por su tipo de gravedad deba de pasar antes que otro triado leve). Se muestra en la *Figura B.34* el nuevo *Process Flow* de la zona de la sala de espera.

*Zone* tiene tantos tokens como haya en esa zona. Lo podemos hacer de dos formas: teniendo las salas de espera en un grupo o por separadas. Depende de la realidad.

El token del paciente en este *Process Flow* no tiene necesariamente que coincidir con el nombre del token del paciente en *Arrivals*.



Figura B.34: Flujograma zona

A continuación, se muestra el modelado de las zonas:

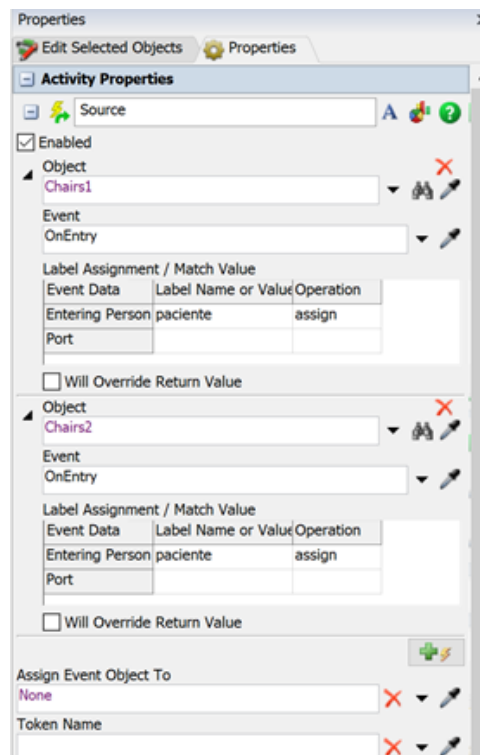


Figura B.35: Propiedades zona

En este modelo disponemos de dos salas de espera separadas, denominadas *Chairs1* y *Chairs2*. Nos interesa obtener las estadísticas del tiempo de los pacientes en estas zonas. La primera

sala de espera (*Chairs1*) se modela de forma similar a la segunda. En *Event* ponemos *OnEntry* porque lo que nos interesa es contar desde que el paciente entra en la zona. El token del paciente en este caso se llama propiamente “paciente” y se le asigna (*assign*) la operación.



Figura B.36: Enter Zone

En la *Figura B.36* se modifica nada.

Atendiendo a la *Figura B.37*, seleccionamos el objeto que nos interesa, en nuestro caso el grupo (piscina de recursos) de la sala de espera. En ese grupo se encuentran *Chairs1* y *Chairs2*. En la asignación se escribe el token del paciente según como lo hayamos nombrado en *Source* y la operación es *match* (que coincida).

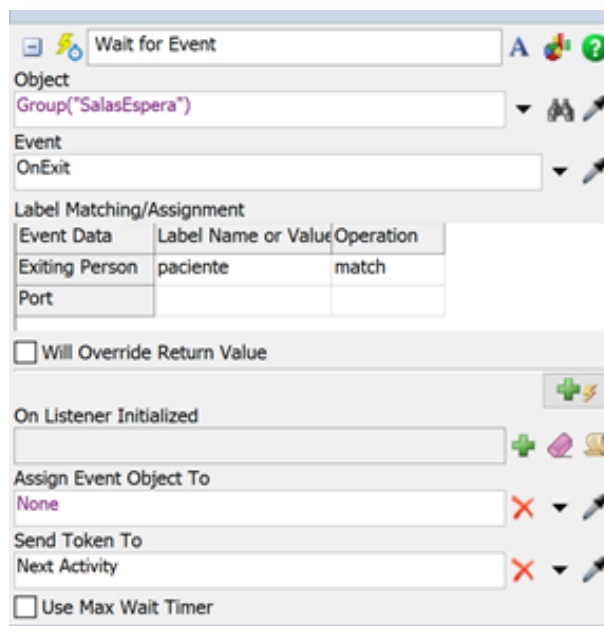


Figura B.37: Wait for Event

Por último, modelamos que el paciente salga. De este modo quedan registradas todas las estadísticas del paciente desde que entra hasta que sale de la sala de espera.



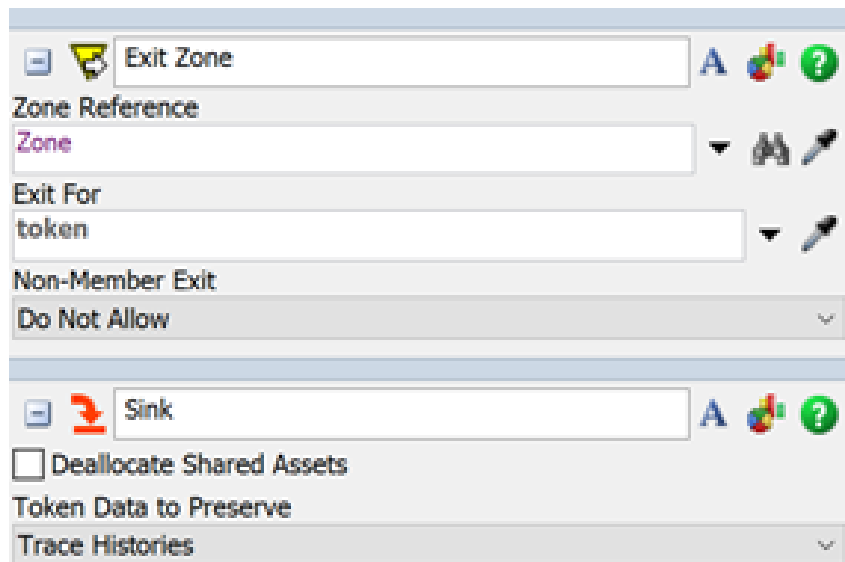


Figura B.38: Exit Zone

Para obtener las estadísticas, pinchamos en el icono *Zone* y donde señala la flecha.

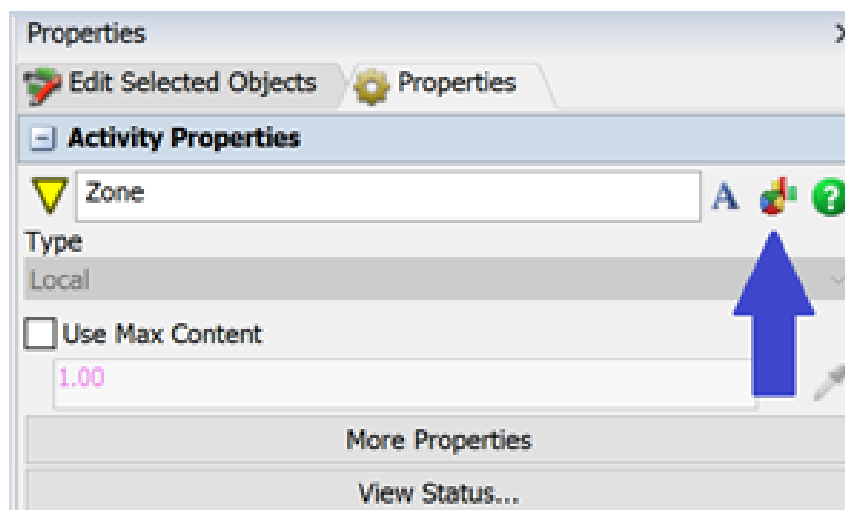


Figura B.39: Añadir estadísticas a dashboard

Se nos abrirá la siguiente ventana:

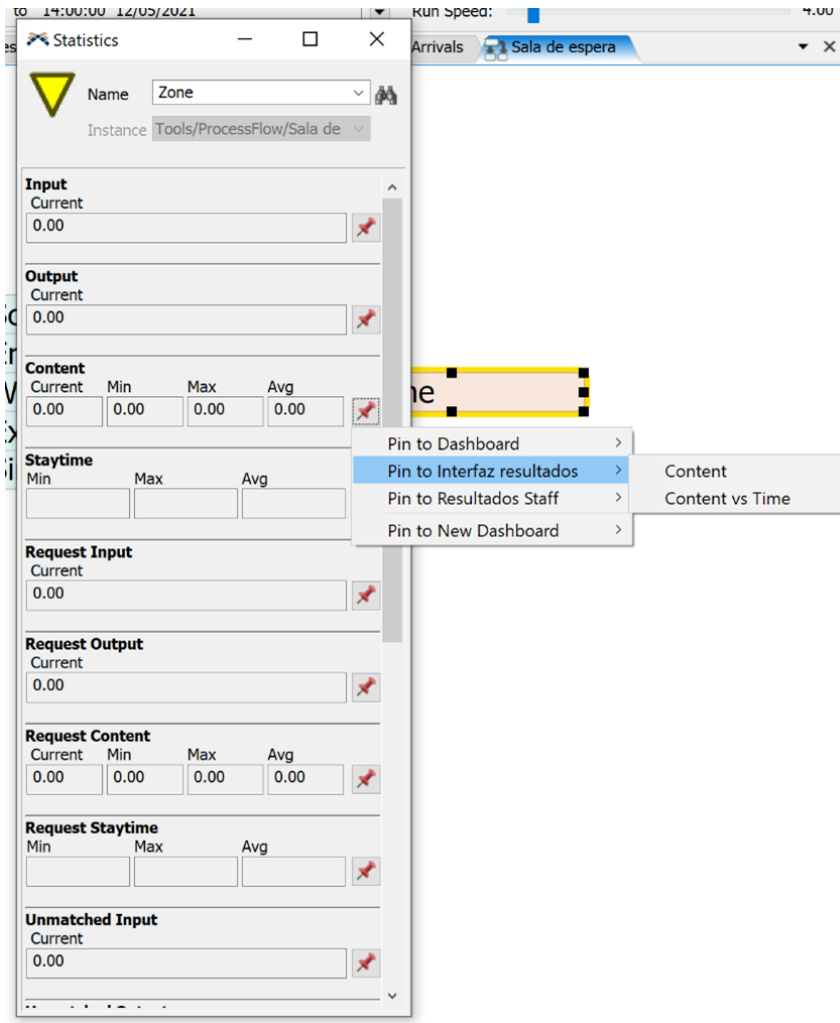


Figura B.40: Pin estadísticas

En este caso se ha optado por mostrar las estadísticas del contenido de la sala de espera. Pulsamos en la chincheta, y seleccionamos el *dashboard* (interfaz de estadísticas) que nos interese (se verá a continuación). A la derecha se nos muestra que tipo de estadísticas queremos mostrar, si únicamente el contenido/pacientes (*Content*) de la sala de esperas o el contenido de la sala de espera en el tiempo (*Content vs Time*).

### B.5.2. Dashboards – interfaz de estadísticas

Se pueden crear tantas interfaces de estadísticas (dashboards) como se quieran. Una buena práctica de programación es crear una interfaz por tipo de la simulación, es decir, el personal sanitario por un lado y los pacientes por otro.

En la *Figura B.41* ya se puede ver como en nuestro modelo tenemos dos *dashboards*, uno para los pacientes (en nuestro caso denominado interfaz resultados) y otro para el personal sanitario (resultados Staff). Para crear uno nuevo simplemente le damos a *Add Blank Dashboard*.

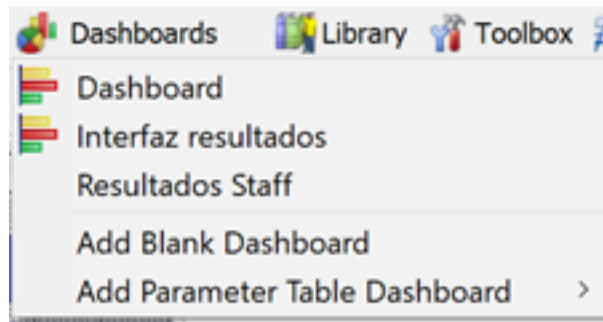


Figura B.41: Añadir un dashboard

Los tiempos medios podemos incluirlos en una tabla de parámetros (*Parameters Table*) de modo que alguien que no sea programador (denominado cliente o usuario final) pueda probar diferentes escenarios en el programa. A ese usuario final le permitimos modificar los valores de la tabla de parámetros a través del *Dashboard*, de modo que nos aseguramos que no modifique nada de la programación y se le facilita el uso del programa de simulación.

Name	Value	Display Units	Description
Frecuencia llegada de pacientes	10	minutos	
Tiempo administracion	2	minutos	
Tiempo toma de muestra	5	minutos	
Tiempo determinacion INR	5	minutos	
Tiempo consulta medica	10	minutos	
Tiempo fijar nueva visita	2	minutos	

Figura B.42: Parameters Table

Para ello, en *Library* seleccionamos *Table* y lo arrastramos al *Dashboard* que hemos creado. Seleccionamos la tabla de parámetros del modelo en *Link*.

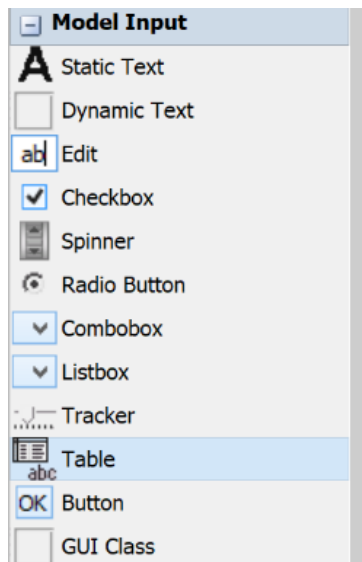


Figura B.43: Model Input

### Dashboard pacientes

En la *Figura B.44*, en la librería (*Library*) tenemos las siguientes gráficas disponibles para los pacientes.

En la *Figura B.45*, hay un icono con dos rectángulos, uno blanco y otro detrás en gris. Si pulsamos sobre ellos nos dan la opción de escoger el tipo de gráfico que queremos representar para esa distribución estadística

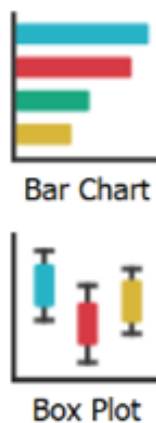


Figura B.44: Tipos de gráficas

- *Staytime*: tiempo de estancia.
- *Avg Milestone Times*: tiempo desde que comienza el hito.
- *Milestone-Milestone Times*: tiempo entre hitos.
- *Avg Time in State*: tiempo medio en estado.
- *Avg Distance*: distancia media recorrida.

- *Avg Wait Times*: tiempos medios de espera.
- *Census*: censo actual en el servicio médico (número de pacientes).
- *Model Throughput*: número de pacientes totales que han acudido al servicio médico.

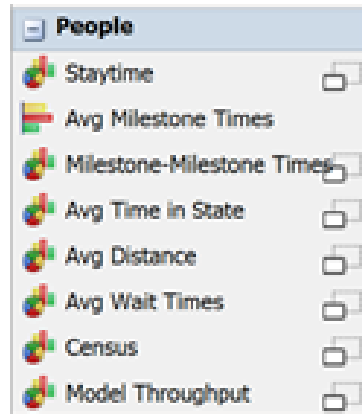


Figura B.45: Estadísticas people

Se dispone a mayores de más estadísticas basadas en la localización y en la distancia recorrida.

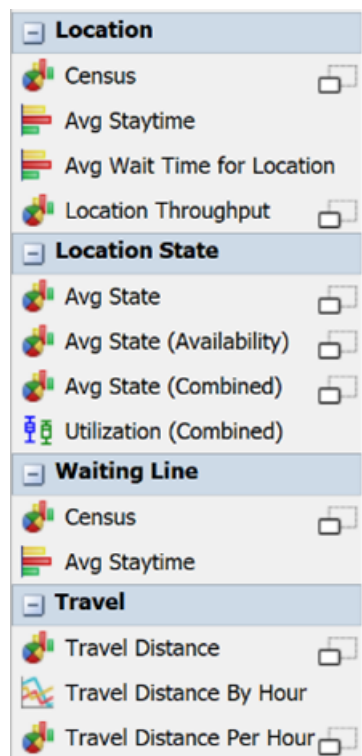


Figura B.46: Varias estadísticas

## Dashboard personal (Staff)

En este *dashboard* se mostrarán las estadísticas relativas al personal sanitario. Hay estadísticas propias para ellos:

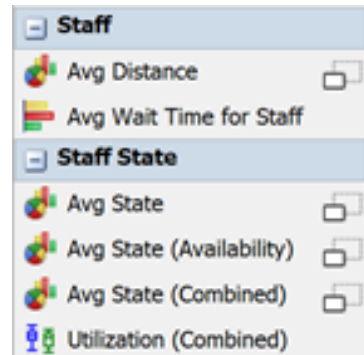


Figura B.47: Estadísticas Staff

- *Avg Distance*: distancia recorrida.
- *Avg Wait Time for Staff*: tiempo medio esperando al personal.
- *Avg State*: tiempos medios en estados.
- *Avg State (Availability)*: porcentaje del tiempo en estado (disponible o adquirido).
- *Avg State (Combined)*: porcentaje del tiempo en estados combinados.
- *Utilization (Combined)*: porcentaje de utilización por horas combinados.

A continuación, se muestran dos tipos de gráficas de *Avg State*:

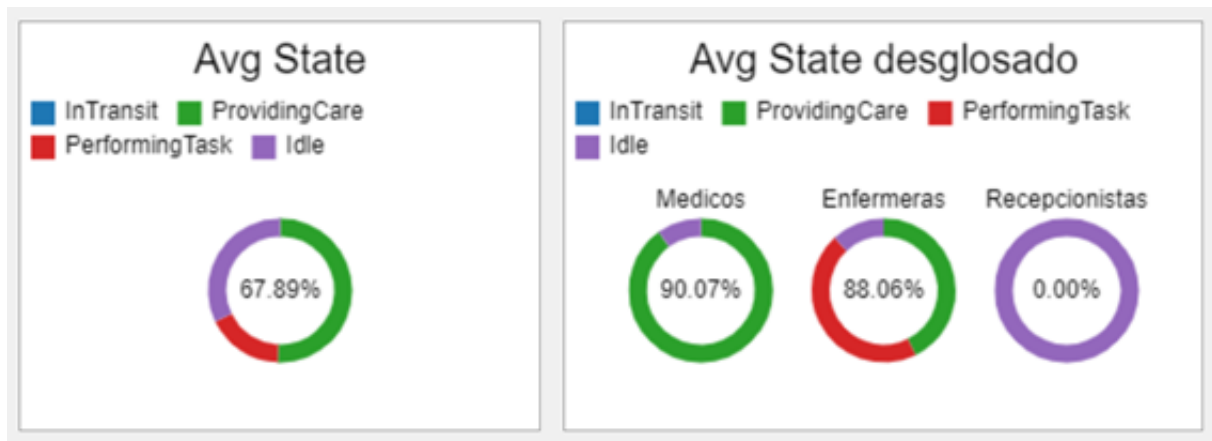


Figura B.48: Ejemplo dashboard staff

La gráfica de la izquierda es la que viene por defecto. Combina las estadísticas de los profesionales sanitarios.

La gráfica de la derecha desglosa las estadísticas por tipo de personal. Para poder obtener esta gráfica debemos seleccionar los que queremos comparar:

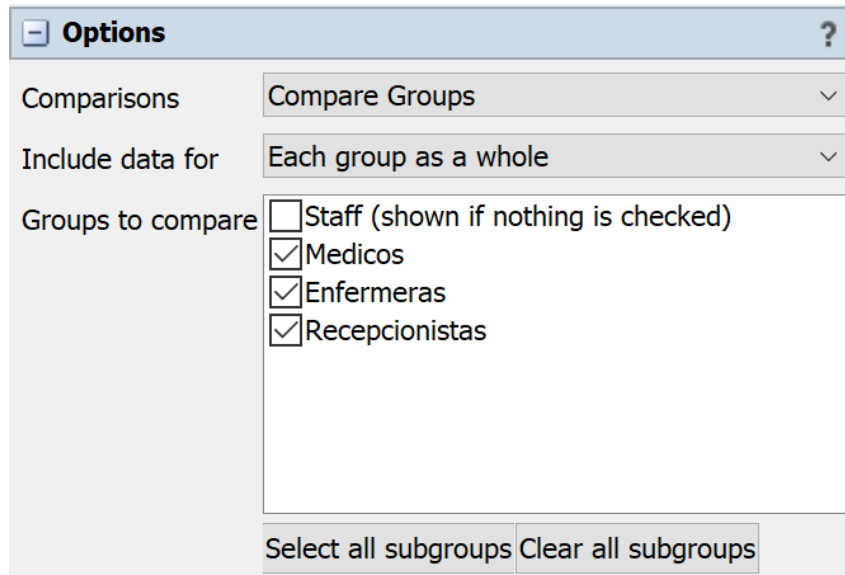


Figura B.49: Opciones del dashboard

Es posible obtener estadísticas detalladas de cada personal sanitario y no en grupo (como en la imagen vista). En *Include data for*: *each member of each group* o *each group and each member*.

Es **importante** deseleccionar el checkbox de Edit Mode con el fin de evitar que los usuarios finales puedan modificar los dashboards.

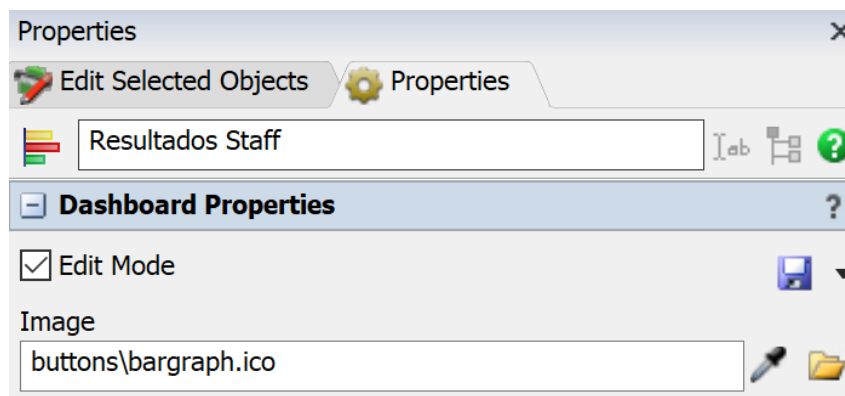


Figura B.50: Propiedades del dashboard





## Apéndice C

# Referencias de la Revisión Sistemática de la Literatura

En las referencias [40-269] encontraremos los casos de estudio analizados.

El resto de artículos analizados en la revisión sistemática y que también forman parte de los resultados, se pueden encontrar en las referencias [270-529].



# Referencias

- [40] M. Abdelghany and A. B. Eltawil. Linking approaches for multi-methods simulation in healthcare systems planning and management. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 26(2):275–290, 2017.
- [41] A. A. Abdul Pari, J. Simon, J. Wolstenholme, J. R. Geddes, and G. M. Goodwin. Economic evaluations in bipolar disorder and a systematic review and critical appraisal. *Bipolar Disord*, 16(6):557–82, 2014.
- [42] T. K. Abe, B. M. Beamon, R. L. Storch, and J. Agus. Operations research applications in hospital operations and part i. *IIE Transactions on Healthcare Systems Engineering*, 6(1):42–54, 2016.
- [43] T. K. Abe, B. M. Beamon, R. L. Storch, and J. Agus. Operations research applications in hospital operations and part iii. *IIE Transactions on Healthcare Systems Engineering*, 6(3):175–191, 2016.
- [44] L. Aboueljineane, E. Sahin, Z. Jemai, and J. Marty. A simulation study to improve the performance of an emergency medical service and application to the french val-de-marne department. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 47:46–59, 2014.
- [45] H. H. A. Afzali, J. Karnon, and J. Gray. A critical review of model-based economic studies of depression and modelling techniques, model structure and data sources. *PharmacoEconomics*, 30(6):461–482, 2012.
- [46] H. H. A. Afzali, J. Karnon, and J. Gray. A proposed model for economic evaluations of major depressive disorder. *European Journal of Health Economics*, 13(4):501–510, 2012.
- [47] P. M. Aguiar, T. M. Lima, and S. Storpirtis. Systematic review of the economic evaluations of novel therapeutic agents in multiple myeloma and what is the reporting quality? *Journal of Clinical Pharmacy and Therapeutics*, 41(2):189–197, 2016.
- [48] V. Ahalt, N. T. Argon, S. Ziya, J. Strickler, and A. Mehrotra. Comparison of emergency department crowding scores and a discrete-event simulation approach. *Health Care Manag Sci*, 21(1):144–155, 2018.

- [49] N. Ahmad, N. A. Ghani, A. A. Kamil, and R. Mat Tahar. Modeling emergency department using a hybrid simulation approach. volume 229 LNEE, pages 701–711. Springer Verlag, 2013.
- [50] Z. Ahmed, T. Elmekawy, and S. Bates. Developing an efficient scheduling template of a chemotherapy treatment unit and a case study. *Australas Med J*, 4(10):575–88, 2011.
- [51] K. B. Ahsan, M. R. Alam, D. G. Morel, and M. A. Karim. Emergency department resource optimisation for improved performance and a review. *Journal of Industrial Engineering International*, 15:253–266, 2019.
- [52] A. Ajdari, L. N. Boyle, N. Kannan, J. Wang, F. P. Rivara, and M. S. Vavilala. Simulation of the emergency department care process for pediatric traumatic brain injury. *Journal for Healthcare Quality*, 40(2):110–118, 2018.
- [53] O. Al-Araidah, A. Boran, and A. Wahsheh. Reducing delay in healthcare delivery at outpatients clinics using discrete event simulation. *International Journal of Simulation Modelling*, 11(4):185–195, 2012.
- [54] K. Al Badi. Discrete event simulation and pharmacy process re-engineering. *Int J Health Care Qual Assur*, 32(2):398–411, 2019.
- [55] A. Ala and F. Chen. Alternative mathematical formulation and hybrid meta-heuristics for patient scheduling problem in health care clinics. *Neural Computing and Applications*, 32(13):8993–9008, 2020.
- [56] F. Albuquerque De Almeida, M. J. Al, R. Koymans, J. Riistama, S. Pauws, and J. L. Severens. Impact of hospitalisation on health-related quality of life in patients with chronic heart failure. *Health and Quality of Life Outcomes*, 18(1), 2020.
- [57] E. Alfonso, X. Xie, V. Augusto, and O. Garraud. Modelling and simulation of blood collection systems and improvement of human resources allocation for better cost-effectiveness and reduction of candidate donor abandonment. *Vox Sanguinis*, 104(3):225–233, 2013.
- [58] M. H. Alhaag, T. Aziz, and I. M. Alharkan. A queuing model for health care pharmacy using software arena. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [59] A. A. Alhaider, N. Lau, P. B. Davenport, and M. K. Morris. Distributed situation awareness and a health-system approach to assessing and designing patient flow management. *Ergonomics*, 63(6):682–709, 2020.
- [60] F. Alkhaldi and A. Alouani. Systemic design approach to a real-time healthcare monitoring system and reducing unplanned hospital readmissions. *Sensors (Switzerland)*, 18(8), 2018.
- [61] F. A. Alkhaldi and A. T. Alouani. Systemic design approach to reducing rates of unplanned hospital readmissions. volume 2017-December, pages 43–49. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

- [62] F. Allen, S. Montgomery, M. Maruszczak, J. Kusel, and N. Adlard. Convergence yet continued complexity and a systematic review and critique of health economic models of relapsing-remitting multiple sclerosis in the united kingdom. *Value in Health*, 18(6):925–938, 2015.
- [63] M. Allen, A. Bhanji, J. Willemsen, S. Dudfield, S. Logan, and T. Monks. A simulation modelling toolkit for organising outpatient dialysis services during the covid- 19 pandemic. *PLoS ONE*, 15(8 August), 2020.
- [64] T. T. Allen. *Introduction to discrete event simulation and agent-based modeling and Voting systems, health care, military, and manufacturing*. Introduction to Discrete Event Simulation and Agent-based Modeling and Voting Systems, Health Care, Military, and Manufacturing. Springer London, 2011.
- [65] M. M. Alvarado, T. G. Cotton, L. Ntaimo, E. Pérez, and W. R. Carpentier. Modeling and simulation of oncology clinic operations in discrete event system specification. *Simulation*, 94(2):105–121, 2018.
- [66] G. H. Anderson, P. J. Jenkins, D. A. McDonald, R. Van Der Meer, A. Morton, M. Nugent, and L. A. Rymaszewski. Cost comparison of orthopaedic fracture pathways using discrete event simulation in a glasgow hospital. *BMJ Open*, 7(9):e014509, 2017.
- [67] D. Antonelli, G. Bruno, and T. Taurino. Analysis of patient flows in elective surgery and modelling and optimisation of the hospitalisation process. *International Journal of Services and Operations Management*, 31(4):513–529, 2018.
- [68] M. Arafeh, M. A. Barghash, E. Sallam, and A. AlSamhouri. Six sigma applied to reduce patients’ waiting time in a cancer pharmacy. *International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage*, 8(2):105–124, 2014.
- [69] A. Arisha and W. Rashwan. Modeling of healthcare systems and past, current and future trends. volume 0, pages 1523–1534. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [70] D. A. Asamoah, R. Sharda, H. N. Rude, and D. Doran. Rfid-based information visibility for hospital operations and exploring its positive effects using discrete event simulation. *Health Care Manag Sci*, 21(3):305–316, 2018.
- [71] A. B. Asl and M. G. Khan. Studying the effect of online medical applications on patients healing time and doctors utilization using discrete event simulation. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [72] M. M. Asrar, D. P. Lad, S. Prinja, and D. Bansal. A systematic review of economic evaluations of treatment regimens in multiple myeloma. *Expert Rev Pharmacoecon Outcomes Res*, pages 1–11, 2020.
- [73] T. M. Assi, K. Rookkapan, J. Rajgopal, V. Sornsrivichai, S. T. Brown, J. S. Welling, B. A. Norman, D. L. Connor, S. I. Chen, R. B. Slayton, Y. Laosiritaworn, A. R. Wateska, S. R.

- Wisniewski, and B. Y. Lee. How influenza vaccination policy may affect vaccine logistics. *Vaccine*, 30(30):4517–4523, 2012.
- [74] V. Augusto, O. Rejeb, X. Xie, S. Aloui, L. Perrier, P. Biron, and T. Durand. Performance evaluation of health information systems using aris modeling and discrete-event simulation. volume 2016-February, pages 1503–1514. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [75] F. Badilla-Murillo, B. Vargas-Vargas, O. Viquez-Acuña, and J. García-Sanz-Calcedo. Analysis of the installed productive capacity in a medical angiography room through discrete event simulation. *Processes*, 8(6), 2020.
- [76] S. Bae, J. Karnon, G. Crane, T. Bessen, J. Desai, P. Crowe, and S. Neuhaus. Cost-effectiveness analysis of imaging surveillance in stage ii and iii extremity soft tissue sarcoma and an australian perspective. *Cost Effectiveness and Resource Allocation*, 18(1), 2020.
- [77] N. Bahou, C. Fenwick, G. Anderson, R. van der Meer, and T. Vassalos. Modeling the critical care pathway for cardiothoracic surgery. *Health Care Manag Sci*, 21(2):192–203, 2018.
- [78] A. E. Bair, W. T. Song, Y. C. Chen, and B. A. Morris. The impact of inpatient boarding on ed efficiency and a discrete-event simulation study. *Journal of Medical Systems*, 34(5):919–929, 2010.
- [79] A. Bal, C. Ceylan, and C. Taçoğlu. Using value stream mapping and discrete event simulation to improve efficiency of emergency departments. *International Journal of Healthcare Management*, 10(3):196–206, 2017.
- [80] C. Banditori, P. Cappanera, and F. Visintin. Investigating the relationship between resources balancing and robustness in master surgical scheduling. volume 61, pages 149–162. Springer New York LLC.
- [81] J. F. Bard, Z. Shu, D. J. Morrice, D. E. Wang, R. Poursani, and L. Leykum. Improving patient flow at a family health clinic. *Health Care Management Science*, 19(2):170–191, 2016.
- [82] R. Bareš, J. Griffiths, V. Knight, J. Williams, K. Baboolal, and A. Nelson. Simulating bed capacity and evaluating the impact of healthcare service transfers. pages 358–362.
- [83] C. Baril, V. Gascon, and S. Cartier. Design and analysis of an outpatient orthopaedic clinic performance with discrete event simulation and design of experiments. *Computers and Industrial Engineering*, 78:285–298, 2014.
- [84] C. Baril, V. Gascon, J. Miller, and C. Bounhol. The importance of considering resource’s tasks when modeling healthcare services with discrete-event simulation and an approach using work sampling method oa. *Journal of Simulation*, 11(2):103–114, 2017.

- [85] C. Baril, V. Gascon, J. Miller, and N. Côté. Use of a discrete-event simulation in a kaizen event and a case study in healthcare. *European Journal of Operational Research*, 249(1):327–339, 2016.
- [86] C. Baril, V. Gascon, and D. Vadeboncoeur. Discrete-event simulation and design of experiments to study ambulatory patient waiting time in an emergency department. *Journal of the Operational Research Society*, 70(12):2019–2038, 2019.
- [87] M. Barton, S. McClean, J. Gillespie, L. Garg, D. Wilson, and K. Fullerton. Is it beneficial to increase the provision of thrombolysis?- a discrete-event simulation model. *QJM*, 105(7):665–673, 2012.
- [88] P. Barton, J. P. Sheppard, C. M. Penalzoza-Ramos, S. Jowett, G. A. Ford, D. Lasserson, J. Mant, R. M. Mellor, T. Quinn, P. M. Rothwell, D. Sandler, D. Sims, and R. J. McManus. When has service provision for transient ischaemic attack improved enough? a discrete event simulation economic modelling study. *BMJ Open*, 7(11):e018189, 2017.
- [89] D. M. Bean, P. Taylor, and R. J. B. Dobson. A patient flow simulator for healthcare management education. *BMJ Simul Technol Enhanc Learn*, 5(1):46–48, 2019.
- [90] M. Beckmann, E. Paterson, and A. Smith. Redesigning induction of labour processes. *Aust N Z J Obstet Gynaecol*, 58(3):315–320, 2018.
- [91] L. Bedoya-Valencia and E. Kirac. Evaluating alternative resource allocation in an emergency department using discrete event simulation. *Simulation*, 92(12):1041–1051, 2016.
- [92] D. Ben-Tovim, J. Filar, P. Hakendorf, S. Qin, C. Thompson, and D. Ward. Hospital event simulation model and arrivals to discharge—design, development and application. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 68:80–94, 2016.
- [93] B. Berg, B. Denton, H. Nelson, H. Balasubramanian, A. Rahman, A. Bailey, and K. Lindor. A discrete event simulation model to evaluate operational performance of a colonoscopy suite. *Medical Decision Making*, 30(3):380–387, 2010.
- [94] T. Bessen, D. M. K. Keefe, and J. Karmon. Does one size fit all? cost utility analyses of alternative mammographic follow-up schedules, by risk of recurrence. *International Journal of Technology Assessment in Health Care*, 31(5):281–288, 2016.
- [95] A. M. Best, C. A. Dixon, W. D. Kelton, C. J. Lindsell, and M. J. Ward. Using discrete event computer simulation to improve patient flow in a ghanaiian acute care hospital. *Am J Emerg Med*, 32(8):917–22, 2014.
- [96] T. Bolt, S. Bayer, M. Kapsali, and S. Brailsford. An analytical framework for group simulation model building. *Health Systems*, 2020.
- [97] M. T. Booker, R. J. O’Connell, B. Desai, and V. A. Duddalwar. Quality improvement with discrete event simulation and a primer for radiologists. *J Am Coll Radiol*, 13(4):417–23, 2016.

- [98] S. Borg, H. Nahi, M. Hansson, D. Lee, J. Elvidge, and U. Persson. Cost effectiveness of pomalidomide in patients with relapsed and refractory multiple myeloma in sweden. *Acta Oncologica*, 55(5):554–560, 2016.
- [99] R. J. Boucherie, E. W. Hans, and T. Hartmann. Health care logistics and space and accounting for the physical build environment.
- [100] D. Bouzon Nagem Assad and T. Spiegel. Improving emergency department resource planning and a multiple case study. *Health Syst (Basingstoke)*, 9(1):2–30, 2020.
- [101] J. Bowers, M. Ghattas, and G. Mould. Exploring alternative routes to realising the benefits of simulation in healthcare. *Journal of the Operational Research Society*, 63(10):1457–1466, 2012.
- [102] J. Bowers, G. Mould, and C. Marshall. Location of services and the impact on healthcare quality and insights from a simulation of a musculoskeletal physiotherapy service. *Journal of the Operational Research Society*, 66(7):1212–1221, 2015.
- [103] B. D. Bradley, S. R. C. Howie, T. C. Y. Chan, and Y. L. Cheng. Estimating oxygen needs for childhood pneumonia in developing country health systems and a new model for expecting the unexpected. *PLoS ONE*, 9(2), 2014.
- [104] Sally C. Brailsford, Tillal Eldabi, Martin Kunc, Navonil Mustafee, and Andres E. Osorio. Hybrid simulation modelling in operational research and a state-of-the-art review. *European Journal of Operational Research*, 278(3):721–737, 2019.
- [105] E. Oliveira BRP, J. A. de Vasconcelos, J. F. F. Almeida, and L. R. Pinto. A simulation-optimisation approach for hospital beds allocation. *Int J Med Inform*, 141:104174, 2020.
- [106] C. S. Brust and R. Clark. System simulation as decision data in healthcare it. volume 2015-January, pages 1317–1328. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [107] A. S. Burns, A. Santos, C. L. Cheng, E. Chan, N. Fallah, D. Atkins, M. F. Dvorak, C. Ho, H. Ahn, J. Paquet, B. K. Kwon, and V. K. Noonan. Understanding length of stay after spinal cord injury and insights and limitations from the access to care and timing project. *J Neurotrauma*, 34(20):2910–2916, 2017.
- [108] N. C. Büyükkaramikli, S. de Groot, R. Riemsma, D. Fayter, N. Armstrong, P. Portegijs, S. Duffy, J. Kleijnen, and M. J. Al. Ribociclib with an aromatase inhibitor for previously untreated, hr-positive, her2-negative, locally advanced or metastatic breast cancer and an evidence review group perspective of a nice single technology appraisal. *PharmacoEconomics*, 37(2):141–153, 2019.
- [109] H. Cai and J. Jia. Using discrete event simulation (des) to support performance-driven healthcare design. *Health Environments Research and Design Journal*, 12(3):89–106, 2019.



- [110] J. R. Campbell, J. C. Johnston, V. J. Cook, M. Sadatsafavi, R. K. Elwood, and F. Marra. Cost-effectiveness of latent tuberculosis infection screening before immigration to low-incidence countries. *Emerging Infectious Diseases*, 25(4):661–671, 2019.
- [111] J. R. Campbell, J. C. Johnston, L. A. Ronald, M. Sadatsafavi, R. F. Balshaw, V. J. Cook, A. Levin, and F. Marra. Screening for latent tuberculosis infection in migrants with ckd and a cost-effectiveness analysis. *Am J Kidney Dis*, 73(1):39–50, 2019.
- [112] Jonathon R. Campbell, James C. Johnston, Mohsen Sadatsafavi, Victoria J. Cook, R. Kevin Elwood, and Fawziah Marra. Cost-effectiveness of post-landing latent tuberculosis infection control strategies in new migrants to canada. *Plos One*, 12(10), 2017.
- [113] L. A. Campbell, J. T. Blake, G. Kephart, E. Grunfeld, and D. MacIntosh. Understanding the effects of competition for constrained colonoscopy services with the introduction of population-level colorectal cancer screening. *Med Decis Making*, 37(2):253–263, 2017.
- [114] H. Cao and S. Huang. Principles of scarce medical resource allocation in natural disaster relief and a simulation approach. *Medical Decision Making*, 32(3):470–476, 2012.
- [115] C. Caprara, F. Visintin, and F. Puggelli. Crowding in paediatric emergency department, a review of the literature and a simulation-based case study. volume 210, pages 293–295. Springer New York LLC.
- [116] C. Caprara, F. Visintin, and F. Puggelli. Crowding in paediatric emergency department, a review of the literature and a simulation-based case study. volume 210, pages 293–295. Springer New York LLC.
- [117] R. Carmen, M. Defraeye, and I. Van Nieuwenhuysse. A decision support system for capacity planning in emergency departments. *International Journal of Simulation Modelling*, 14(2):299–312, 2015.
- [118] J. J. Caro. Discretely integrated condition event (dice) simulation for pharmacoeconomics. *PharmacoEconomics*, 34(7):665–672, 2016.
- [119] J. J. Caro, A. H. Briggs, U. Siebert, and K. M. Kuntz. Modeling good research practices-overview and a report of the ispor-smdm modeling good research practices task force-1. *Medical Decision Making*, 32(5):667–677, 2012.
- [120] J. J. Caro, J. Möller, and D. Getsios. Discrete event simulation and the preferred technique for health economic evaluations? *Value Health*, 13(8):1056–60, 2010.
- [121] G. Celano, A. Costa, S. Fichera, and G. Tringali. Linking six sigma to simulation and a new roadmap to improve the quality of patient care. *Int J Health Care Qual Assur*, 25(4):254–73, 2012.
- [122] M. A. Centeno and K. A. Diaz. Simulating health care systems and a tutorial. volume 2016-February, pages 1835–1849. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

- [123] K. Chahal and T. Eldabi. Hybrid simulation and modes of governance in uk healthcare. *Transforming Government and People, Process and Policy*, 5(2):143–154, 2011.
- [124] K. Chahal, T. Eldabi, and T. Young. A conceptual framework for hybrid system dynamics and discrete event simulation for healthcare. *Journal of Enterprise Information Management*, 26(1):50–74, 2013.
- [125] D. Chalk and M. Pitt. Fractured neck of femur patients and rehabilitation and the acute hospital. *British Journal of Health Care Management*, 21(3):146–151, 2015.
- [126] P. Chemweno, V. Thijs, L. Pintelon, and A. Van Horenbeek. Discrete event simulation case study and diagnostic path for stroke patients in a stroke unit. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 48:45–57, 2014.
- [127] J. Chen, D. Chun, M. D. Oliveira, and A. Fernandes. An analysis on the research orientations in healthcare simulation modeling. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [128] W. Chen, H. Guo, and K. L. Tsui. A new medical staff allocation via simulation optimisation for an emergency department in hong kong. *International Journal of Production Research*, 58(19):6004–6023, 2020.
- [129] J. Chhatwal, T. He, and M. A. Lopez-Olivo. Systematic review of modelling approaches for the cost effectiveness of hepatitis c treatment with direct-acting antivirals. *Pharmacoeconomics*, 34(6):551–567, 2016.
- [130] L. Chia and W. D. Lin. Simulation study of patient arrivals and doctors scheduling in a children’s emergency department. volume 2016-December, pages 321–325. IEEE Computer Society.
- [131] M. Cho, M. Song, S. Yoo, and H. A. Reijers. An evidence-based decision support framework for clinician medical scheduling. *IEEE Access*, 7:15239–15249, 2019.
- [132] A. Chraïbi, A. A. El Cadi, S. Kharraja, and A. Artiba. Using discrete event simulation to evaluate operating theater layout. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12):95–98, 2016.
- [133] K. S. K. Chung, A. Komashie, and N. Yorke-Smith. Envisioning complexity in healthcare systems using discrete event simulation and social network analysis. pages 1094–1095. Association for Computing Machinery.
- [134] G. P. Cimellaro, M. Malavisi, and S. Mahin. Using discrete event simulation models to evaluate resilience of an emergency department. *Journal of Earthquake Engineering*, 21(2):203–226, 2017.
- [135] G. P. Cimellaro and M. Piqué. Seismic performance of health care facilities using discrete event simulation models. In *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, volume 33, pages 203–215. Kluwer Academic Publishers, 2015.

- [136] G. P. Cimellaro and M. Piqué. Resilience of a hospital emergency department under seismic event. *Advances in Structural Engineering*, 19(5):825–836, 2016.
- [137] D. Cocchi, E. Ciagli, A. Ancora, P. Tortoli, C. Carpini, D. Cirone, E. Rossi, F. Frosini, and S. Vezzosi. Improving patient waiting time of centralized front office service in a regional hub hospital using the discrete event simulation model. *Technol Health Care*, 28(5):487–494, 2019.
- [138] D. Cocchi, F. Frosini, E. Ciagli, P. Tortoli, C. Carpini, D. Cirone, and A. Belardinelli. Discrete event simulation model for the analysis of centralized front office service in a regional hub hospital. volume 68, pages 559–562. Springer Verlag.
- [139] M. Comas, A. Arrospide, J. Mar, M. Sala, E. Vilaprinyó, C. Hernández, F. Cots, J. Martínez, and X. Castells. Budget impact analysis of switching to digital mammography in a population-based breast cancer screening program and a discrete event simulation model. *PLoS ONE*, 9(5), 2014.
- [140] M. Comas, J. Mendivil, M. Andreu, C. Hernández, and X. Castells. Long-term prediction of the demand of colonoscopies generated by a population-based colorectal cancer screening program. *PLoS ONE*, 11(10), 2016.
- [141] M. Comas, R. Román, J. M. Quintana, and X. Castells. Unmet needs and waiting list prioritization for knee arthroplasty. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 468(3):789–797, 2010.
- [142] U. Corazza, R. Filippini, and R. Setola. Discrete event simulation of a proton therapy facility and a case study. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 102(3):305–316, 2011.
- [143] J. Criddle and J. Holt. Use of simulation software in optimizing pacu operations and promoting evidence-based practice guidelines. *J Perianesth Nurs*, 33(4):420–425, 2018.
- [144] C. Crossan, J. Lord, R. Ryan, L. Nherera, and T. Marshall. Cost effectiveness of case-finding strategies for primary prevention of cardiovascular disease and a modelling study. *British Journal of General Practice*, 67(654):e67–e77, 2017.
- [145] E. A. Cudney, R. A. Baru, I. Guardiola, T. Materla, W. Cahill, R. Phillips, B. Mutter, D. Warner, and C. Masek. A decision support simulation model for bed management in healthcare. *Int J Health Care Qual Assur*, 32(2):499–515, 2019.
- [146] E. D’Andrea, N. K. Choudhry, B. Raby, G. L. Weinhouse, and M. Najafzadeh. A bronchial-airway gene-expression classifier to improve the diagnosis of lung cancer and clinical outcomes and cost-effectiveness analysis. *International Journal of Cancer*, 146(3):781–790, 2020.

- [147] A. Das. Impact of the covid-19 pandemic on the workflow of an ambulatory endoscopy center and an assessment by discrete event simulation. *Gastrointestinal Endoscopy*, 92(4):914–924, 2020.
- [148] T. E. Day, A. R. Al-Roubaie, and E. J. Goldlust. Decreased length of stay after addition of healthcare provider in emergency department triage and a comparison between computer-simulated and real-world interventions. *Emergency Medicine Journal*, 30(2):134–138, 2013.
- [149] T. E. Day, N. Ravi, H. Xian, and A. Brugh. Sensitivity of diabetic retinopathy associated vision loss to screening interval in an agent-based/discrete event simulation model. *Computers in Biology and Medicine*, 47(1):7–12, 2014.
- [150] S. J. de Jong and W. W. A. Beelaerts van Blokland. Measuring lean implementation for maintenance service companies. *International Journal of Lean Six Sigma*, 7(1):35–61, 2016.
- [151] R. De Rouck, M. Debacker, I. Hubloue, S. Koghee, F. Van Utterbeeck, and E. Dhondt. Simedis 2.0 and on the road toward a comprehensive mass casualty incident medical management simulator. volume 2018-December, pages 2713–2724. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [152] M. Debacker, F. Van Utterbeeck, C. Ullrich, E. Dhondt, and I. Hubloue. Simedis and a discrete-event simulation model for testing responses to mass casualty incidents. *J Med Syst*, 40(12):273, 2016.
- [153] M. DeFauw, V. N. Nair, and Y. Yang. Cost-effectiveness analysis in health policy decision making and direct methods for progressive multi-state processes. *IIE Transactions on Healthcare Systems Engineering*, 2(2):112–130, 2012.
- [154] K. Degeling, M. D. Franken, A. M. May, M. G. H. van Oijen, M. Koopman, C. J. A. Punt, M. J. Ijzerman, and H. Koffijberg. Matching the model with the evidence and comparing discrete event simulation and state-transition modeling for time-to-event predictions in a cost-effectiveness analysis of treatment in metastatic colorectal cancer patients. *Cancer Epidemiology*, 57:60–67, 2018.
- [155] Mohammad Dehghanimohammadabadi and Thomas K. Keyser. Intelligent simulation and integration of simio and matlab to deploy decision support systems to simulation environment. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 71:45–60, 2017.
- [156] E. Demir, M. M. Gunal, and D. Southern. Demand and capacity modelling for acute services using discrete event simulation. *Health Systems*, 6(1):33–40, 2017.
- [157] E. Demir, D. Southern, A. Verner, and W. Amoaku. A simulation tool for better management of retinal services. *BMC Health Serv Res*, 18(1):759, 2018.
- [158] Eren Demir and David Southern. Enabling better management of patients and discrete event simulation combined with the star approach. *Journal of the Operational Research Society*, 68(5):577–590, 2017.

- [159] E. A. Demircan-Yıldız and N. Fescioglu-Unver. A mobile asset sharing policy for hospitals with real time locating systems. *Technol Health Care*, 24(1):121–33, 2016.
- [160] S. Deo, S. Singh, N. Jha, N. Arinaminpathy, and P. Dewan. Predicting the impact of patient and private provider behavior on diagnostic delay for pulmonary tuberculosis patients in india and a simulation modeling study. *PLoS Medicine*, 17(5), 2020.
- [161] C. M. DeRienzo, R. J. Shaw, P. Meanor, E. Lada, J. Ferranti, and D. Tanaka. A discrete event simulation tool to support and predict hospital and clinic staffing. *Health Informatics J*, 23(2):124–133, 2017.
- [162] P. Devapriya, C. T. Strömblad, M. D. Bailey, S. Frazier, J. Bulger, S. T. Kemberling, and K. E. Wood. Stratbam and a discrete-event simulation model to support strategic hospital bed capacity decisions. *J Med Syst*, 39(10):130, 2015.
- [163] A. Diamant, J. Milner, and F. Quereshy. Dynamic patient scheduling for multi-appointment health care programs. *Production and Operations Management*, 27(1):58–79, 2018.
- [164] J. M. Dieleman, P. S. Myles, L. Bulfone, S. Younie, B. van Zaane, D. McGiffin, M. Moodie, and L. Gao. Cost-effectiveness of routine transoesophageal echocardiography during cardiac surgery and a discrete-event simulation study. *Br J Anaesth*, 124(2):136–145, 2020.
- [165] T. Dilla, J. Möller, P. O’Donohoe, M. Álvarez, J. A. Sacristán, M. Happich, and A. Tockhorn. Long-acting olanzapine versus long-acting risperidone for schizophrenia in spain - a cost-effectiveness comparison. *BMC Psychiatry*, 14:298, 2014.
- [166] A. Djanatliev and R. German. Prospective healthcare decision-making by combined system dynamics, discrete-event and agent-based simulation. pages 270–281.
- [167] Q. Doan, W. Hall, S. Shechter, N. Kissoon, S. Sheps, J. Singer, H. Wong, and D. Johnson. Forecasting the effect of physician assistants in a pediatric ed. *Journal of the American Academy of Physician Assistants*, 27(8):35–41, 2014.
- [168] C. Dosi, M. Iori, A. Kramer, and M. Vignoli. Facing implementation barriers to healthcare simulation studies. volume 316, pages 117–129. Springer.
- [169] F. Dougherty, K. C. Hoffman, H. Huntington, J. Jun, D. Klein, K. Lee, B. Schoener, and M. Walters. Modeling the u.s. healthcare system as an enterprise and multi-scale hybrid data analytic methods. pages 461–466.
- [170] D. R. Eitel, S. E. Rudkin, M. A. Malvey, J. P. Killeen, and J. M. Pines. Improving service quality by understanding emergency department flow and a white paper and position statement prepared for the american academy of emergency medicine. *Journal of Emergency Medicine*, 38(1):70–79, 2010.
- [171] S. El Kafhali and K. Salah. Performance modelling and analysis of internet of things enabled healthcare monitoring systems. *IET Networks*, 8(1):48–58, 2019.

- [172] M. Elbattah and O. Molloy. Coupling simulation with machine learning and a hybrid approach for elderly discharge planning [applied to hip fracture care in ireland]. pages 47–56. Association for Computing Machinery, Inc.
- [173] A. Erekat, G. Servis, S. C. Madathil, and M. T. Khasawneh. Efficient operating room planning using an ensemble learning approach to predict surgery cancellations. *IJSE Transactions on Healthcare Systems Engineering*, 10(1):18–32, 2020.
- [174] W. Erhardt, K. Bergenheim, I. Duprat-Lomon, and P. McEwan. Cost effectiveness of saxagliptin and metformin versus sulfonylurea and metformin in the treatment of type 2 diabetes mellitus in germany and a cardiff diabetes model analysis. *Clin Drug Investig*, 32(3):189–202, 2012.
- [175] M. M. Ershadi, M. J. Ershadi, and S. T. A. Niaki. An integrated hfmea-des model for performance improvement of general hospitals and a case study. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 38(1):1–24, 2020.
- [176] P. Escudero-Marin and M. Pidd. Using abms to simulate emergency departments. pages 1239–1250.
- [177] M. P. Fabian, G. Adamkiewicz, N. K. Stout, M. Sandel, and J. I. Levy. A simulation model of building intervention impacts on indoor environmental quality, pediatric asthma, and costs. *J Allergy Clin Immunol*, 133(1):77–84, 2014.
- [178] M. P. Fabian, N. K. Stout, G. Adamkiewicz, A. Geggel, C. Ren, M. Sandel, and J. I. Levy. The effects of indoor environmental exposures on pediatric asthma and a discrete event simulation model. *Environ Health*, 11:66, 2012.
- [179] M. Fakhimi, A. Anagnostou, L. Stergioulas, and S. J. E. Taylor. A hybrid agent-based and discrete event simulation approach for sustainable strategic planning and simulation analytics. volume 2015-January, pages 1573–1584. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [180] M. P. Fanti and W. Ukovich. Discrete event systems models and methods for different problems in healthcare management. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [181] J. Fard, K. O. Roper, and J. Hess. Simulation of home-hospital impacts on crowding – fm implications. *Facilities*, 34(13-14):748–765, 2016.
- [182] P. Favier, A. Poulos, J. A. Vásquez, P. Aguirre, and J. C. De La Llera. Seismic risk assessment of an emergency department of a chilean hospital using a patient-oriented performance model. *Earthquake Spectra*, 35(2):489–512, 2019.
- [183] Wen-Hsin Feng, Zhouyang Lou, Nan Kong, and Hong Wan. A multiobjective stochastic genetic algorithm for the pareto-optimal prioritization scheme design of real-time healthcare resource allocation. *Operations Research for Health Care*, 15:32–42, 2017.

- [184] N. M. Ferraro, C. B. Reamer, T. A. Reynolds, L. J. Howell, J. S. Moldenhauer, and T. E. Day. Capacity planning for maternal-fetal medicine using discrete event simulation. *Am J Perinatol*, 32(8):761–70, 2015.
- [185] A. S. Fialho, M. D. Oliveira, and A. B. Sá. Using discrete event simulation to compare the performance of family health unit and primary health care centre organizational models in portugal. *BMC Health Serv Res*, 11:274, 2011.
- [186] M. Findlay and H. Grant. An application of discrete-event simulation to an outpatient healthcare clinic with batch arrivals. pages 1166–1177.
- [187] D. Forner, G. Hoit, C. W. Noel, A. Eskander, J. R. de Almeida, M. H. Rigby, and D. Naimark. Decision modeling for economic evaluation in otolaryngology-head and neck surgery and review of techniques. *Otolaryngol Head Neck Surg*, page 194599820957288, 2020.
- [188] D. L. Fournier and G. S. Zaric. Simulating neonatal intensive care capacity in british columbia. *Socio-Economic Planning Sciences*, 47(2):131–141, 2013.
- [189] V. Fragoulakis, E. Kastritis, T. Psaltopoulou, and N. Maniadakis. Economic evaluation of therapies for patients suffering from relapsed-refractory multiple myeloma in greece. *Cancer Management and Research*, 5(1):37–48, 2013.
- [190] R. B. Fricks and K. S. Trivedi. Analysis methods for performance & availability in critical care medicine. volume 2016-April. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [191] R. B. Fricks, H. Tseng, M. Veihl, K. S. Trivedi, and R. C. Barr. Robust prediction of treatment times in concurrent patient care. *Conference proceedings and ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual Conference*, 2018:5370–5373, 2018.
- [192] R. W. B. Fricks, H. H. Tseng, M. Pajic, and K. S. Trivedi. Transient performance & availability modeling in high volume outpatient clinics. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [193] C. M. Froehle and D. L. White. Interruption and forgetting in knowledge-intensive service environments. *Production and Operations Management*, 23(4):704–722, 2014.
- [194] Xinyu Fu, Alva Presbitero, Sergey V. Kovalchuk, and Valeria V. Krzhizhanovskaya. Coupling game theory and discrete-event simulation for model-based ambulance dispatching. volume 136, pages 398–407. Elsevier B.V.
- [195] N. Furian, D. Neubacher, M. O’Sullivan, C. Walker, and C. Pizzera. Gedmod – towards a generic toolkit for emergency department modeling. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 87:239–273, 2018.
- [196] N. Furian, M. O’Sullivan, C. Walker, and S. Vössner. Evaluating the impact of optimization algorithms for patient transits dispatching using discrete event simulation. *Operations Research for Health Care*, 19:134–155, 2018.

- [197] D. Furushima, H. Yamada, M. Kido, and Y. Ohno. The impact of one-dose package of medicines on patient waiting time in dispensing pharmacy and application of a discrete event simulation model. *Biological and Pharmaceutical Bulletin*, 41(3):409–418, 2018.
- [198] S. Gangadharan and B. Belpanno. A simulated level loading of supply and demand for beds in a tertiary care children’s hospital reduces overall bed requirements. *Qual Manag Health Care*, 24(4):207–11, 2015.
- [199] A. Gao, N. D. Osgood, W. An, and R. F. Dyck. A tripartite hybrid model architecture for investigating health and cost impacts and intervention tradeoffs for diabetic end-stage renal disease. volume 2015-January, pages 1676–1687. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [200] Laura Garcia-Jurado, Itziar Oyagueez, Miguel Angel Casado, Cristina Tural, Juan Gonzalez-Garcia, Enrique Ortega, and Juan Antonio Pineda. Evaluation of the costs of transient elastography (fibrosan (r)) in the diagnosis of liver fibrosis in hiv patients with hepatitis c virus. *Enfermedades Infecciosas Y Microbiologia Clinica*, 30(6):294–299, 2012.
- [201] D. Garcia-Vicuña, L. Esparza, and F. Mallor. Safely learning intensive care unit management by using a management flight simulator. *Operations Research for Health Care*, 27, 2020.
- [202] F. W. Gardiner, H. Johns, L. Bishop, and L. Churilov. Royal flying doctor service coronavirus disease 2019 activity and surge modeling in australia. *Air Medical Journal*, 39(5):404–409, 2020.
- [203] M. Geitona, E. Stamuli, S. Giannakodimos, V. K. Kimiskidis, V. Kountouris, M. Charokopou, and P. Christou. Lacosamide as a first-line treatment option in focal epilepsy and a cost-utility analysis for the greek healthcare system. *Journal of Medical Economics*, 22(4):359–364, 2019.
- [204] D. Getsios, S. Blume, K. J. Ishak, G. Maclaine, and L. Hernández. An economic evaluation of early assessment for alzheimer’s disease in the united kingdom. *Alzheimers Dement*, 8(1):22–30, 2012.
- [205] D. Getsios, S. Blume, K. J. Ishak, and G. D. H. Maclaine. Cost effectiveness of donepezil in the treatment of mild to moderate alzheimer’s disease and a uk evaluation using discrete-event simulation. *PharmacoEconomics*, 28(5):411–427, 2010.
- [206] D. Getsios, J. P. Marton, N. Revankar, A. J. Ward, R. J. Willke, D. Rublee, K. J. Ishak, and J. G. Xenakis. Smoking cessation treatment and outcomes patterns simulation and a new framework for evaluating the potential health and economic impact of smoking cessation interventions. *PharmacoEconomics*, 31(9):767–780, 2013.
- [207] A. Geva and J. Gray. A quantitative analysis of optimal treatment capacity for perinatal asphyxia. *Medical Decision Making*, 32(2):266–272, 2012.



- [208] M. J. Glover, E. Jones, K. L. Masconi, M. J. Sweeting, and S. G. Thompson. Discrete event simulation for decision modeling in health care and lessons from abdominal aortic aneurysm screening. *Med Decis Making*, 38(4):439–451, 2018.
- [209] A. Goehler, B. P. Geisler, J. M. Manne, B. Jahn, A. Conrads-Frank, P. Schnell-Inderst, G. S. Gazelle, and U. Siebert. Decision-analytic models to simulate health outcomes and costs in heart failure and a systematic review. *Pharmacoeconomics*, 29(9):753–69, 2011.
- [210] A. Gogi, A. A. Tako, and S. Robinson. An experimental investigation into the role of simulation models in generating insights. *European Journal of Operational Research*, 249(3):931–944, 2016.
- [211] A. Goienetxea Uriarte, E. Ruiz Zúñiga, M. Urenda Moris, and A. H. C. Ng. How can decision makers be supported in the improvement of an emergency department? a simulation, optimization and data mining approach. *Operations Research for Health Care*, 15:102–122, 2017.
- [212] L. Gold, E. Balal, T. Horak, R. L. Cheu, T. Mehmetoglu, and O. Gurbuz. Health screening strategies for international air travelers during an epidemic or pandemic. *Journal of Air Transport Management*, 75:27–38, 2019.
- [213] A. Gosavi, E. A. Cudney, S. L. Murray, and C. M. Masek. Analysis of clinic layouts and patient-centered procedural innovations using discrete-event simulation. *EMJ - Engineering Management Journal*, 28(3):134–144, 2016.
- [214] Henk Groen, Esther G. Neelis, Marten J. Poley, Joanne F. Olieman, Rene Scheenstra, Paul F. M. Krabbe, Gerard Dijkstra, and Edmond H. H. M. Rings. Intestinal rehabilitation for children with intestinal failure is cost-effective and a simulation study. *American Journal of Clinical Nutrition*, 105(2):417–425, 2017.
- [215] R. E. Guerrero-Ludueña, M. Comas, M. Espallargues, M. Coll, M. Pons, S. Sabatés, A. Allepuz, and X. Castells. Predicting the burden of revision knee arthroplasty and simulation of a 20-year horizon. *Value Health*, 19(5):680–7, 2016.
- [216] M. Gul, A. Fuat Guneri, and M. M. Gunal. Emergency department network under disaster conditions and the case of possible major istanbul earthquake. *Journal of the Operational Research Society*, 71(5):733–747, 2020.
- [217] M. Gul and A. F. Guneri. A discrete event simulation model of an emergency department network for earthquake conditions. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [218] S. Gul, B. T. Denton, J. W. Fowler, and T. Huschka. Bi-criteria scheduling of surgical services for an outpatient procedure center. *Production and Operations Management*, 20(3):406–417, 2011.
- [219] M. M. Gunal. A guide for building hospital simulation models. *Health Systems*, 1(1):17–25, 2012.

- [220] H. Guo, S. Gao, K. L. Tsui, and T. Niu. Simulation optimization for medical staff configuration at emergency department in hong kong. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 14(4):1655–1665, 2017.
- [221] S. Guo, D. Getsios, L. Hernandez, K. Cho, E. Lawler, A. Altincatal, S. Lanes, and M. Blankenburg. Florbetaben pet in the early diagnosis of alzheimer’s disease and a discrete event simulation to explore its potential value and key data gaps. *International Journal of Alzheimer’s Disease*, 2012.
- [222] S. Guo, D. Getsios, N. Revankar, P. Xu, G. Thompson, J. Bobula, L. Lacey, and M. Gaudig. Evaluating disease-modifying agents and a simulation framework for alzheimer’s disease. *PharmacoEconomics*, 32(11):1129–1139, 2014.
- [223] S. Guo, L. Hernandez, R. Wasiak, and M. Gaudig. Modelling the clinical and economic implications of galantamine in the treatment of mild-to-moderate alzheimer’s disease in germany. *Journal of Medical Economics*, 13(4):641–654, 2010.
- [224] E. D. Gönül-Sezer and Z. Ocak. Comparison of system dynamics and discrete event simulation approaches. volume 442, pages 69–81. Springer Verlag, 2016.
- [225] M. M. Günal and M. Pidd. Discrete event simulation for performance modelling in health care and a review of the literature. *Journal of Simulation*, 4(1):42–51, 2010.
- [226] M. G. Haddad, P. P. Zouein, J. Salem, and R. Otayek. Case study of lean in hospital admissions to inspire culture change. *EMJ - Engineering Management Journal*, 28(4):209–223, 2016.
- [227] S. Hahn-Goldberg, E. Chow, E. Appel, F. T. Ko, P. Tan, M. B. Gavin, T. Ng, H. B. Abrams, L. K. Casaubon, and M. W. Carter. Discrete event simulation of patient admissions to a neurovascular unit. *J Healthc Eng*, 5(3):347–59, 2014.
- [228] L. A. Haidari, D. L. Connor, A. R. Wateska, S. T. Brown, L. E. Mueller, B. A. Norman, M. M. Schmitz, P. Paul, J. Rajgopal, J. S. Welling, J. Leonard, S. I. Chen, and B. Y. Lee. Augmenting transport versus increasing cold storage to improve vaccine supply chains. *PLoS ONE*, 8(5), 2013.
- [229] H. Hajjarsaraei, B. Shirazi, and J. Rezaeian. Scenario-based analysis of fast track strategy optimization on emergency department using integrated safety simulation. *Safety Science*, 107:9–21, 2018.
- [230] E. Hajrizi and D. Berisha. Application of discrete events simulation for the department of emergency at peja regional hospital case study kosovo. volume 52, pages 376–381. Elsevier B.V.
- [231] S. Hamana, V. Augusto, and X. Xie. Modelling interactions between health institutions in the context of patient care pathway. volume 463, pages 448–455. Springer New York LLC, 2015.

- [232] E. Hamrock, K. Paige, J. Parks, J. Scheulen, and S. Levin. Discrete event simulation for healthcare organizations and a tool for decision making. *Journal of Healthcare Management*, 58(2):110–124, 2013.
- [233] A. Harper and N. Mustafee. Proactive service recovery in emergency departments and a hybrid modelling approach using forecasting and real-time simulation. pages 201–204. Association for Computing Machinery, Inc.
- [234] A. Harper, N. Mustafee, and M. Feeney. A hybrid approach using forecasting and discrete-event simulation for endoscopy services. pages 1583–1594. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [235] P. R. Harper, N. H. Powell, and J. E. Williams. Modelling the size and skill-mix of hospital nursing teams. *Journal of the Operational Research Society*, 61(5):768–779, 2010.
- [236] S. Hartz, D. Getsios, S. Tao, S. Blume, and G. Maclaine. Evaluating the cost effectiveness of donepezil in the treatment of alzheimer’s disease in germany using discrete event simulation. *BMC Neurology*, 12, 2012.
- [237] I. Hasan, E. Bahalkeh, and Y. Yih. Evaluating intensive care unit admission and discharge policies using a discrete event simulation model. *Simulation*, 96(6):501–518, 2020.
- [238] J. A. Heim, H. Huang, Z. B. Zabinsky, J. Dickerson, M. Wellner, M. Astion, D. Cruz, J. Vincent, and R. Jack. Design and implementation of a combined influenza immunization and tuberculosis screening campaign with simulation modelling. *J Eval Clin Pract*, 21(4):727–34, 2015.
- [239] M. Henriksson, R. Jindal, C. Sternhufvud, K. Bergenheim, E. Sörstadius, and M. Willis. A systematic review of cost-effectiveness models in type 1 diabetes mellitus. *PharmacoEconomics*, 34(6):569–585, 2016.
- [240] M. Hensen, B. Heeg, M. Lthgren, and B. Van Hout. Cost effectiveness of long-acting risperidone in sweden. *Applied Health Economics and Health Policy*, 8(5):327–341, 2010.
- [241] R. Hernández, J. M. Burr, L. Vale, A. Azuara-Blanco, J. A. Cook, K. Banister, A. Tuulonen, M. Ryan, A. Botello-Pinzon, Y. Takwoingi, M. Vazquez-Montes, A. Elders, R. Asaoka, J. Van Der Schoot, C. Fraser, A. King, H. Lemij, R. Sanders, S. Vernon, A. Kotecha, P. Glasziou, D. Garway-Heath, D. Crabb, R. Perera, J. Deeks, and group for the Surveillance of Ocular Hypertension Study. Monitoring ocular hypertension, how much and how often? a cost-effectiveness perspective. *British Journal of Ophthalmology*, 100(9):1263–1268, 2016.
- [242] P. Hershey, B. Umberger, and R. Chang. Adaptable mission analysis and decision system. pages 164–169. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [243] H. Higashi and J. J. Barendregt. Cost-effectiveness of total hip and knee replacements for the australian population with osteoarthritis and discrete-event simulation model. *PLoS One*, 6(9):e25403, 2011.

- [244] L. B. Holm, F. A. Dahl, and M. Barra. Towards a multimethodology in health care—synergies between soft systems methodology and discrete event simulation. *Health Systems*, 2(1):11–23, 2013.
- [245] L. B. Holm, H. Lurås, and F. A. Dahl. Improving hospital bed utilisation through simulation and optimisation and with application to a 40 % increase in patient volume in a norwegian general hospital. *Int J Med Inform*, 82(2):80–9, 2013.
- [246] T. Hoyer, R. Bekkers, H. Gooszen, L. Massuger, M. Rovers, and J. P. Grutters. Cost-effectiveness of early-initiated treatment for advanced-stage epithelial ovarian cancer patients and a modeling study. *Int J Gynecol Cancer*, 24(1):75–84, 2014.
- [247] S. Hu and J. A. Heim. Developing domain-specific simulation objects for modeling clinical laboratory operations. volume 2015-January, pages 1341–1352. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [248] X. Hu, S. Barnes, and B. Golden. Applying queueing theory to the study of emergency department operations and a survey and a discussion of comparable simulation studies. *International Transactions in Operational Research*, 25(1):7–49, 2018.
- [249] S. Huang, J. Maingard, H. K. Kok, C. D. Barras, V. Thijs, R. V. Chandra, D. M. Brooks, and H. Asadi. Optimizing resources for endovascular clot retrieval for acute ischemic stroke, a discrete event simulation. *Front Neurol*, 10:653, 2019.
- [250] P. J. H. Hulshof, P. T. Vanberkel, R. J. Boucherie, E. W. Hans, M. van Houdenhoven, and J. K. C. W. van Ommeren. Analytical models to determine room requirements in outpatient clinics. *OR Spectrum*, 34(2):391–405, 2012.
- [251] N. A. Hussein, T. F. Abdelmaguid, B. S. Tawfik, and N. G. S. Ahmed. Mitigating overcrowding in emergency departments using six sigma and simulation and a case study in egypt. *Operations Research for Health Care*, 15:1–12, 2017.
- [252] N. Huynh, R. Snyder, J. M. Vidal, O. Sharif, B. Cai, B. Parsons, and K. Bennett. Assessment of the nurse medication administration workflow process. *Journal of Healthcare Engineering*, 2016, 2016.
- [253] H. Hvitfeldt-Forsberg, P. Mazzocato, D. Glaser, C. Keller, and M. Unbeck. Staffs’ and managers’ perceptions of how and when discrete event simulation modelling can be used as a decision support in quality improvement and a focus group discussion study at two hospital settings in sweden. *BMJ Open*, 7(5):e013869, 2017.
- [254] R. Iannone, A. Lambiase, S. Miranda, S. Riemma, and D. Sarno. Cost savings in hospital materials management and look-back versus look-ahead inventory policies. *International Journal of Services and Operations Management*, 22(1):60–85, 2015.

- [255] A. Igarashi, R. Goto, K. Suwa, R. Yoshikawa, A. J. Ward, and J. Moller. Cost-effectiveness analysis of smoking cessation interventions in japan using a discrete-event simulation. *Applied Health Economics and Health Policy*, 14(1):77–87, 2016.
- [256] G. Improta, G. Guizzi, C. Ricciardi, V. Giordano, A. M. Ponsiglione, G. Converso, and M. Triassi. Agile six sigma in healthcare and case study at santobono pediatric hospital. *Int J Environ Res Public Health*, 17(3), 2020.
- [257] K. Ismail, M. Thorwarth, and A. Arisha. Integrated decision support systems for improving emergency department performance in irish hospitals. *International Journal of Operational Research*, 19(1):40–59, 2014.
- [258] S. H. Jacobson, S. N. Hall, and J. R. Swisher. Discrete-event simulation of health care systems. In *International Series in Operations Research and Management Science*, volume 206, pages 273–309. Springer New York LLC, 2013.
- [259] B. Jahn, K. P. Pfeiffer, E. Theurl, J. E. Tarride, and R. Goeree. Capacity constraints and cost-effectiveness and a discrete event simulation for drug-eluting stents. *Med Decis Making*, 30(1):16–28, 2010.
- [260] B. Jahn, E. Theurl, U. Siebert, and K. P. Pfeiffer. Tutorial in medical decision modeling incorporating waiting lines and queues using discrete event simulation. *Value Health*, 13(4):501–6, 2010.
- [261] M. N. Jat and R. A. Rafique. Mass-casualty distribution for emergency healthcare and a simulation analysis. *International Journal of Disaster Risk Science*, 11(3):364–377, 2020.
- [262] Y. Jiang and W. Ni. Expected lifetime numbers, risks, and burden of osteoporotic fractures for 50-year old chinese women and a discrete event simulation incorporating frax. *Journal of Bone and Mineral Metabolism*, 34(6):714–722, 2016.
- [263] F. Jiao, E. Y. F. Wan, C. S. C. Fung, A. K. C. Chan, S. M. McGhee, R. L. P. Kwok, and C. L. K. Lam. Cost-effectiveness of a primary care multidisciplinary risk assessment and management program for patients with diabetes mellitus (ramp-dm) over lifetime. *Endocrine*, 63(2):259–269, 2019.
- [264] H. Jin, P. Tappenden, J. H. MacCabe, S. Robinson, and S. Byford. Evaluation of the cost-effectiveness of services for schizophrenia in the uk across the entire care pathway in a single whole-disease model. *JAMA Netw Open*, 3(5):e205888, 2020.
- [265] P. E. Joustra, J. de Wit, V. M. D. Struben, B. J. H. Overbeek, P. Fockens, and S. G. Elkhuisen. Reducing access times for an endoscopy department by an iterative combination of computer simulation and linear programming. *Health Care Management Science*, 13(1):17–26, 2010.

- [266] F. Ju, H. K. Lee, R. U. Osarogiagbon, X. Yu, N. Faris, and J. Li. Computer modeling of lung cancer diagnosis-to-treatment process. *Translational Lung Cancer Research*, 4(4):404–414, 2015.
- [267] K. Kaku, M. Haneda, H. Sakamaki, A. Yasui, T. Murata, A. Ustyugova, R. Chin, T. Hirase, T. Shibahara, N. Hayashi, A. Kansal, S. Kaspers, and T. Okamura. Cost-effectiveness analysis of empagliflozin in japan based on results from the asian subpopulation in the empa-reg outcome trial. *Clin Ther*, 41(10):2021–2040.e11, 2019.
- [268] A. Kammoun, T. Loukil, and W. Hachicha. The use of discrete event simulation in hospital supply chain management. pages 143–148. IEEE Computer Society.
- [269] A. Kansal, O. S. Reifsnider, I. Proskorovsky, Y. Zheng, E. Pfarr, J. T. George, P. Kandaswamy, and A. Ruffolo. Cost-effectiveness analysis of empagliflozin treatment in people with type 2 diabetes and established cardiovascular disease in the empa-reg outcome trial. *Diabet Med*, 36(11):1494–1502, 2019.
- [270] A. Karakra, F. Fontanili, E. Lamine, J. Lamothe, and A. Taweel. Pervasive computing integrated discrete event simulation for a hospital digital twin. volume 2018-November. IEEE Computer Society.
- [271] J. Karnon, J. Stahl, A. Brennan, J. J. Caro, J. Mar, and J. Möller. Modeling using discrete event simulation and a report of the ispor-smdm modeling good research practices task force-4. *Value Health*, 15(6):821–7, 2012.
- [272] T. L. Kauf, R. A. Farkouh, S. R. Earnshaw, M. E. Watson, P. Maroudas, and M. G. Chambers. Economic efficiency of genetic screening to inform the use of abacavir sulfate in the treatment of hiv. *PharmacoEconomics*, 28(11):1025–1039, 2010.
- [273] P. Kazemian, M. Y. Sir, M. P. Van Oyen, J. K. Lovely, D. W. Larson, and K. S. Pasupathy. Coordinating clinic and surgery appointments to meet access service levels for elective surgery. *Journal of Biomedical Informatics*, 66:105–115, 2017.
- [274] L. Keshtkar, W. Rashwan, W. Abo-Hamad, and A. Arisha. A hybrid system dynamics, discrete event simulation and data envelopment analysis to investigate boarding patients in acute hospitals. *Operations Research for Health Care*, 26, 2020.
- [275] K. R. Keyloun, E. Lofgren, and S. Hebert. Modeling operational quality metrics and costs of long-acting antibiotics for acute bacterial skin and skin structure infection treatment in the emergency department. *J Med Econ*, 22(7):652–661, 2019.
- [276] S. Khanna, D. Sier, J. Boyle, and K. Zeitz. Discharge timeliness and its impact on hospital crowding and emergency department flow performance. *Emerg Med Australas*, 28(2):164–70, 2016.

- [277] B. Kim, Y. Elstein, B. Shiner, R. Konrad, A. S. Pomerantz, and B. V. Watts. Use of discrete event simulation to improve a mental health clinic. *Gen Hosp Psychiatry*, 35(6):668–70, 2013.
- [278] I. Kisliakovskii, M. Balakhontceva, S. Kovalchuk, N. Zvartau, and A. Konradi. Towards a simulation-based framework for decision support in healthcare quality assessment. volume 119, pages 207–214. Elsevier B.V.
- [279] C. Kittipittayakorn and K. C. Ying. Using the integration of discrete event and agent-based simulation to enhance outpatient service quality in an orthopedic department. *J Healthc Eng*, 2016, 2016.
- [280] M. G. Klein and G. Reinhardt. Emergency department patient flow simulations using spreadsheets. *Simulation in Healthcare*, 7(1):40–47, 2012.
- [281] V. A. Knight, J. E. Williams, and I. Reynolds. Modelling patient choice in healthcare systems and development and application of a discrete event simulation with agent-based decision making. *Journal of Simulation*, 6(2):92–102, 2012.
- [282] N. Koizumi, R. Ganesan, M. Gentili, C. H. Chen, N. Waters, D. Dasgupta, D. Nicholas, A. Patel, D. Srinivasan, and K. Melancon. Redesigning organ allocation boundaries for liver transplantation in the united states. volume 61, pages 15–27. Springer New York LLC.
- [283] A. Kolker. *Healthcare management engineering and What does this fancy term really mean? and The use of operations management methodology for quantitative decision-making in healthcare settings*. Healthcare Management Engineering and What Does This Fancy Term Really Mean? and The Use of Operations Management Methodology for Quantitative Decision-Making in Healthcare Settings. Springer New York, 2012.
- [284] T. Kongnakorn, M. Mwamburi, S. Merchant, K. Akhras, J. J. Caro, and D. Nathwani. Economic evaluation of doripenem for the treatment of nosocomial pneumonia in the us and discrete event simulation. *Curr Med Res Opin*, 26(1):17–24, 2010.
- [285] T. Kongnakorn, J. A. Sterchele, C. G. Salvador, D. Getsios, and M. Mwamburi. Economic implications of using bendamustine, alemtuzumab, or chlorambucil as a first-line therapy for chronic lymphocytic leukemia in the us and a cost-effectiveness analysis. *Clinicoecon Outcomes Res*, 6:141–9, 2014.
- [286] K. Kongpakwattana and N. Chaiyakunapruk. Application of discrete-event simulation in health technology assessment and a cost-effectiveness analysis of alzheimer’s disease treatment using real-world evidence in thailand. *Value in Health*, 23(6):710–718, 2020.
- [287] R. Konrad, S. Ficarra, C. Danko, R. Wallace, and C. Archambeault. A decision-support approach for provider scheduling in a patient-centered medical home. *Journal of Healthcare Management*, 62(1):46–59, 2017.

- [288] R. Konrad, C. Tang, B. Shiner, and B. V. Watts. Workforce design in primary care-mental health integration and a case study at one veterans affairs medical center. *Health Systems*, 6(2):148–160, 2017.
- [289] K. Kotiadis, A. A. Tako, and C. Vasilakis. A participative and facilitative conceptual modelling framework for discrete event simulation studies in healthcare. *Journal of the Operational Research Society*, 65(2):197–213, 2014.
- [290] S. V. Kovalchuk, A. A. Funkner, O. G. Metsker, and A. N. Yakovlev. Simulation of patient flow in multiple healthcare units using process and data mining techniques for model identification. *Journal of Biomedical Informatics*, 82:128–142, 2018.
- [291] M. Koyuncu, O. M. Araz, W. Zeger, and P. Damien. A simulation model for optimizing staffing in the emergency department. volume 210, pages 201–208. Springer New York LLC.
- [292] D. Kozłowski and D. Worthington. Use of queue modelling in the analysis of elective patient treatment governed by a maximum waiting time policy. *European Journal of Operational Research*, 244(1):331–338, 2015.
- [293] E. M. La, K. H. Lich, R. Wells, A. R. Ellis, M. S. Swartz, R. Zhu, and J. P. Morrissey. Increasing access to state psychiatric hospital beds and exploring supply-side solutions. *Psychiatr Serv*, 67(5):523–8, 2016.
- [294] C. Laan, M. van de Vrugt, J. Olsman, and R. J. Boucherie. Static and dynamic appointment scheduling to improve patient access time. *Health Syst (Basingstoke)*, 7(2):148–159, 2018.
- [295] L. F. Laker, E. Torabi, D. J. France, C. M. Froehle, E. J. Goldlust, N. R. Hoot, P. Kasaie, M. S. Lyons, L. H. Barg-Walkow, M. J. Ward, and R. L. Wears. Understanding emergency care delivery through computer simulation modeling. *Acad Emerg Med*, 25(2):116–127, 2018.
- [296] T. M. Lal, T. Roh, and T. Huschka. Simulation based optimization and applications in healthcare. volume 2016-February, pages 1261–1271. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [297] Guillaume Lame, Oualid Jouini, and Julie Stal-Le Cardinal. Combining soft systems methodology, ethnographic observation, and discrete-event simulation and a case study in cancer care. *Journal of the Operational Research Society*, 71(10):1545–1562, 2020.
- [298] J. Lamprecht, R. Kolisch, and D. Pförringer. The impact of medical documentation assistants on process performance measures in a surgical emergency department. *Eur J Med Res*, 24(1):31, 2019.
- [299] G. Lamé, O. Jouini, J. S. L. Cardinal, M. Carvalho, C. Tournigand, and P. Wolkenstein. Patient-hospital communication and a platform to improve outpatient chemotherapy. volume 0, pages 2099–2110. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.



- [300] P. Landa, M. La Regina, E. Tànfani, F. Orlandini, M. Campanini, A. Fontanella, D. Manfredotto, and A. Testi. Modelling hospital medical wards to address patient complexity and a case-based simulation-optimization approach. volume 316, pages 25–39. Springer.
- [301] P. Landa, M. Sonnessa, M. Resta, E. Tànfani, and A. Testi. A hybrid simulation approach to analyse patient boarding in emergency departments. volume 210, pages 133–144. Springer New York LLC.
- [302] P. Landa, M. Sonnessa, E. Tànfani, and A. Testi. Managing emergent patient flow to inpatient wards and a discrete event simulation approach. volume 402, pages 333–350. Springer Verlag, 2015.
- [303] P. Landa, M. Sonnessa, E. Tànfani, and A. Testi. Multiobjective bed management considering emergency and elective patient flows. *International Transactions in Operational Research*, 25(1):91–110, 2018.
- [304] I. Larrañaga, P. Stafylas, A. Fullaondo, G. M. Apuzzo, and J. Mar. Economic evaluation of an integrated health and social care program for heart failure through 2 different modeling techniques. *Health Serv Res Manag Epidemiol*, 5:2333392818795795, 2018.
- [305] E. Larsen, C. Haubitz, C. Wernz, and R. Ratwani. Improving electronic health record downtime contingency plans with discrete-event simulation. volume 2016-March, pages 3179–3188. IEEE Computer Society.
- [306] Alexander Lassnig, Theresa Rienmueller, Diether Kramer, Werner Leodolter, Christian Baumgartner, and Joerg Schroettner. A novel hybrid modeling approach for the evaluation of integrated care and economic outcome in heart failure treatment. *Bmc Medical Informatics and Decision Making*, 19(1), 2019.
- [307] Alexander Lassnig and Joerg Schroettner. Comparison of telemedical and conventional treatment of heart failure patients considering different approaches to in-hospital stay. *Biomedical Engineering-Biomedizinische Technik*, 58, 2013.
- [308] J. I. Lather and J. I. Messner. Framework for a hybrid simulation approach for an integrated decision support system in healthcare facilities. volume 2018-December, pages 1406–1417. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [309] Q. A. Le. Patient-level modeling approach using discrete-event simulation and a cost-effectiveness study of current treatment guidelines for women with postmenopausal osteoporosis. *J Manag Care Spec Pharm*, 25(10):1089–1095, 2019.
- [310] Q. A. Le, J. W. Hay, R. Becker, and Y. Wang. Cost-effectiveness analysis of sequential treatment of abaloparatide followed by alendronate versus teriparatide followed by alendronate in postmenopausal women with osteoporosis in the united states. *Ann Pharmacother*, 53(2):134–143, 2019.

- [311] R. Lebcir, E. Demir, R. Ahmad, C. Vasilakis, and D. Southern. A discrete event simulation model to evaluate the use of community services in the treatment of patients with parkinson's disease in the united kingdom. *BMC Health Serv Res*, 17(1):50, 2017.
- [312] S. Levin and M. Garifullin. Simulating wait time in healthcare and accounting for transition process variability using survival analyses. volume 2016-February, pages 1252–1260. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [313] B. L. Limone, W. L. Baker, J. Kluger, and C. I. Coleman. Novel anticoagulants for stroke prevention in atrial fibrillation and a systematic review of cost-effectiveness models. *PLoS ONE*, 8(4), 2013.
- [314] W. D. Lin and L. Chia. Combined forecasting of patient arrivals and doctor rostering simulation modelling for hospital emergency department. volume 2017-December, pages 2391–2395. IEEE Computer Society.
- [315] J. Liu, X. Wang, and M. Cheng E. Simulation modeling and analysis on asset planning for emergency medical system (ems). pages 1353–1357.
- [316] S. Liu, Y. Li, K. P. Triantis, H. Xue, and Y. Wang. The diffusion of discrete event simulation approaches in health care management in the past four decades and a comprehensive review. *MDM Policy Pract*, 5(1):2381468320915242, 2020.
- [317] S. Lucidi, M. Maurici, L. Paulon, F. Rinaldi, and M. Roma. A derivative-free approach for a simulation-based optimization problem in healthcare. *Optimization Letters*, 10(2):219–235, 2016.
- [318] S. Lucidi, M. Maurici, L. Paulon, F. Rinaldi, and M. Roma. A simulation-based multiobjective optimization approach for health care service management. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 13(4):1480–1491, 2016.
- [319] L. Luo, H. Liu, H. Liao, S. Tang, Y. Shi, and H. Guo. Discrete event simulation models for ct examination queuing in west china hospital. *Comput Math Methods Med*, 2016:2731675, 2016.
- [320] C. Mahulea, L. Mahulea, J. M. Garcia-Soriano, and J. M. Colom. Petri nets with resources for modeling primary healthcare systems. pages 639–644. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [321] N. Mandahawi, S. Al-Shihabi, A. A. Abdallah, and Y. M. Alfarah. Reducing waiting time at an emergency department using design for six sigma and discrete event simulation. *International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage*, 6(1-2):91–104, 2010.
- [322] N. Mandahawi, M. Shurrab, S. Al-Shihabi, A. A. Abdallah, and Y. M. Alfarah. Utilizing six sigma to improve the processing time and a simulation study at an emergency department. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 34(7):495–503, 2017.

- [323] G. Manoj, J. Samson Immanuel, P. S. Divya, and A. P. Haran. Modelling of system configuration and reconfiguration for ims. volume 350 CCIS, pages 285–292. 2012.
- [324] J. Mar, A. Arrospe, J. M. Begiristain, I. Larrañaga, E. Elosegui, and J. Oliva-Moreno. The impact of acquired brain damage in terms of epidemiology, economics and loss in quality of life. *BMC Neurology*, 11, 2011.
- [325] J. F. Marchesi, S. Hamacher, and J. L. Fleck. A stochastic programming approach to the physician staffing and scheduling problem. *Computers and Industrial Engineering*, 142, 2020.
- [326] Y. N. Marmor, B. J. Kemp, T. R. Huschka, R. L. Ruter, D. M. McConnell, and T. R. Rohleder. Improving patient access in nuclear medicine and a case study of pet scanner scheduling. *Quality Management in Health Care*, 22(4):293–305, 2013.
- [327] K. Marsh, J. Möller, H. Basarir, P. Orfanos, and P. Detzel. The economic impact of lower protein infant formula for the children of overweight and obese mothers. *Nutrients*, 8(1), 2016.
- [328] D. A. Marshall, L. Burgos-Liz, I. Jzerman MJ, W. Crown, W. V. Padula, P. K. Wong, K. S. Pasupathy, M. K. Higashi, and N. D. Osgood. Selecting a dynamic simulation modeling method for health care delivery research-part 2 and report of the ispor dynamic simulation modeling emerging good practices task force. *Value Health*, 18(2):147–60, 2015.
- [329] D. A. Marshall, L. Burgos-Liz, I. Jzerman MJ, N. D. Osgood, W. V. Padula, M. K. Higashi, P. K. Wong, K. S. Pasupathy, and W. Crown. Applying dynamic simulation modeling methods in health care delivery research-the simulate checklist and report of the ispor simulation modeling emerging good practices task force. *Value Health*, 18(1):5–16, 2015.
- [330] D. A. Marshall, L. R. Grazziotin, D. A. Regier, S. Wordsworth, J. Buchanan, K. Phillips, and M. Ijzerman. Addressing challenges of economic evaluation in precision medicine using dynamic simulation modeling. *Value in Health*, 23(5):566–573, 2020.
- [331] D. McKetta, T. E. Day, V. Jones, A. Perri, and S. C. Nicolson. Managing disruptions to patient flow capacity and rapid-cycle improvement in a pediatric cardiac procedure complex. *Jt Comm J Qual Patient Saf*, 42(7):321–4, 2016.
- [332] P. McMeekin, D. Flynn, M. Allen, D. Coughlan, G. A. Ford, H. Lumley, J. S. Balami, M. A. James, K. Stein, D. Burgess, and P. White. Estimating the effectiveness and cost-effectiveness of establishing additional endovascular thrombectomy stroke centres in england and a discrete event simulation. *BMC Health Serv Res*, 19(1):821, 2019.
- [333] Y. Meng, S. Ward, K. Cooper, S. Harnan, and L. Wyld. Cost-effectiveness of mri and pet imaging for the evaluation of axillary lymph node metastases in early stage breast cancer. *European Journal of Surgical Oncology*, 37(1):40–46, 2011.
- [334] M. Mes and M. Bruens. A generalized simulation model of an integrated emergency post.

- [335] B. Mielczarek. Combining simulation techniques to understand demographic dynamics and forecast hospital demands. volume 2019-December, pages 1114–1125. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [336] B. Mielczarek and J. Zabawa. Modeling healthcare demand using a hybrid simulation approach. volume 0, pages 1535–1546. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [337] B. Mielczarek and J. Zabawa. Simulation model for studying impact of demographic, temporal, and geographic factors on hospital demand. pages 4498–4500. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [338] S. Mohiuddin, R. Gardiner, M. Crofts, P. Muir, J. Steer, J. Turner, H. Wheeler, W. Hollingworth, and P. J. Horner. Modelling patient flows and resource use within a sexual health clinic through discrete event simulation to inform service redesign. *BMJ Open*, 10(7), 2020.
- [339] Daniel Moldaver, Manjusha Hurry, William K. Evans, Parneet K. Cheema, Randeep Sangha, Ronald Burkes, Barbara Melosky, Diana Tran, Darryl Boehm, Jaya Venkatesh, Susan Walisser, Erik Orava, and Daniel Grima. Development, validation and results from the impact of treatment evolution in non-small cell lung cancer (iten) model. *Lung Cancer*, 139:185–194, 2020.
- [340] T. Monks, M. Pitt, K. Stein, and M. James. Maximizing the population benefit from thrombolysis in acute ischemic stroke and a modeling study of in-hospital delays. *Stroke*, 43(10):2706–11, 2012.
- [341] J. A. B. Montevechi and J. D. Friend. Using a soft systems methodology framework to guide the conceptual modeling process in discrete event simulation.
- [342] S. M. Montgomery, J. Kusel, R. Nicholas, and N. Adlard. Costs and effectiveness of fingolimod versus alemtuzumab in the treatment of highly active relapsing-remitting multiple sclerosis in the uk and re-treatment, discount, and disutility. *Journal of Medical Economics*, 20(9):962–973, 2017.
- [343] K. Moons, G. Waeyenbergh, P. Timmermans, D. De Ridder, and L. Pintelon. Evaluating replenishment systems for disposable supplies at the operating theater and a simulation case study. volume 316, pages 147–162. Springer.
- [344] N. Moretto, T. A. Comans, A. T. Chang, S. P. O’Leary, S. Osborne, H. E. Carter, D. Smith, T. Cavanagh, D. Blond, and M. Raymer. Implementation of simulation modelling to improve service planning in specialist orthopaedic and neurosurgical outpatient services. *Implement Sci*, 14(1):78, 2019.
- [345] D. Morgareidge, H. Cai, and J. Jia. Performance-driven design with the support of digital tools and applying discrete event simulation and space syntax on the design of the emergency department. *Frontiers of Architectural Research*, 3(3):250–264, 2014.

- [346] A. Mousavi, A. Komashie, and S. Tavakoli. Simulation-based real-time performance monitoring (simmon) and a platform for manufacturing and healthcare systems. pages 600–611.
- [347] L. E. Mueller, L. A. Haidari, A. R. Wateska, R. J. Phillips, M. M. Schmitz, D. L. Connor, B. A. Norman, S. T. Brown, J. S. Welling, and B. Y. Lee. The impact of implementing a demand forecasting system into a low-income country’s supply chain. *Vaccine*, 34(32):3663–3669, 2016.
- [348] U. K. Mukherjee and K. K. Sinha. Robot-assisted surgical care delivery at a hospital and policies for maximizing clinical outcome benefits and minimizing costs. *Journal of Operations Management*, 66(1-2):227–256, 2020.
- [349] N. Mustafee, K. Katsaliaki, and S. J. E. Taylor. Profiling literature in healthcare simulation. *Simulation*, 86(8-9):543–558, 2010.
- [350] N. Mustafee, S. Taylor, K. Katsaliaki, Y. Dwivedi, and M. Williams. Motivations and barriers in using distributed supply chain simulation. *International Transactions in Operational Research*, 19(5):733–751, 2012.
- [351] M. Najafzadeh, J. A. Garces, and A. Maciel. Economic evaluation of implementing a novel pharmacogenomic test (idgenetix®) to guide treatment of patients with depression and/or anxiety. *PharmacoEconomics*, 35(12):1297–1310, 2017.
- [352] S. Nambiar, M. E. Mayorga, M. C. O’Leary, K. H. Lich, and S. B. Wheeler. A simulation model to assess the impact of insurance expansion on colorectal cancer screening at the population level. volume 2018-December, pages 2701–2712. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [353] Hermine L. Nguena Nguetack, Henri Gwet, Sophie Desmonde, Odile Ouwe Missi Oukem-Boyer, Celine Nkenfou, Mathurin Tejiokem, Patrice Tchendjou, Irene Domkam, Valeriane Leroy, and Ahmadou Alioum. Estimating mother-to-child hiv transmission rates in cameroon in 2011 and a computer simulation approach. *Bmc Infectious Diseases*, 16, 2016.
- [354] L. K. N. Nguyen, I. Megiddo, and S. Howick. Simulation models for transmission of health care-associated infection and a systematic review. *Am J Infect Control*, 48(7):810–821, 2020.
- [355] W. Ni and Y. Jiang. Evaluation on the cost-effective threshold of osteoporosis treatment on elderly women in china using discrete event simulation model. *Osteoporosis International*, 28(2):529–538, 2017.
- [356] H. Niessner, M. S. Rauner, and W. J. Gutjahr. A dynamic simulation–optimization approach for managing mass casualty incidents. *Operations Research for Health Care*, 17:82–100, 2018.

- [357] Amin Nikakhtar and Simon M. Hsiang. Incorporating the dynamics of epidemics in simulation models of healthcare systems. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 43:67–78, 2014.
- [358] N. M. Nkwanyana and A. S. Voce. Are there decision support tools that might strengthen the health system for perinatal care in south african district hospitals? a review of the literature. *BMC Health Serv Res*, 19(1):731, 2019.
- [359] K. M. Noon, S. M. Montgomery, N. E. Adlard, and M. A. Kroes. When does economic model type become a decisive factor in health technology appraisals? learning from the expanding treatment options for relapsing–remitting multiple sclerosis. *Journal of Medical Economics*, 21(10):983–992, 2018.
- [360] S. Noorain, K. Kotiadis, and M. P. Scaparra. Application of discrete-event simulation for planning and operations issues in mental healthcare. volume 2019-December, pages 1184–1195. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [361] N. Nuñez-Perez, M. Ortíz-Barrios, S. McClean, K. Salas-Navarro, G. Jimenez-Delgado, and A. Castillo-Zea. Discrete-event simulation to reduce waiting time in accident and emergency departments and a case study in a district general clinic. volume 10586 LNCS, pages 352–363. Springer Verlag, 2017.
- [362] B. S. S. Onggo, N. C. Proudlove, S. A. D’Ambrogio, A. Calabrese, S. Bisogno, and N. Levialedi Ghiron. A bpmn extension to support discrete-event simulation for healthcare applications and an explicit representation of queues, attributes and data-driven decision points. *Journal of the Operational Research Society*, 69(5):788–802, 2018.
- [363] M. Ordu, E. Demir, and C. Tofallis. A decision support system for demand and capacity modelling of an accident and emergency department. *Health Syst (Basingstoke)*, 9(1):31–56, 2020.
- [364] M. Ordu, E. Demir, C. Tofallis, and M. M. Gunal. A novel healthcare resource allocation decision support tool and a forecasting-simulation-optimization approach. *Journal of the Operational Research Society*, 2020.
- [365] E. S. Orman, M. E. Mayorga, S. B. Wheeler, R. M. Townsley, H. H. Toro-Diaz, P. H. Hayashi, and A. Iv Sidney Barritt. Declining liver graft quality threatens the future of liver transplantation in the united states. *Liver Transplantation*, 21(8):1040–1050, 2015.
- [366] M. A. Ortiz and P. López-Meza. Using computer simulation to improve patient flow at an outpatient internal medicine department. volume 10069 LNCS, pages 294–299. Springer Verlag, 2016.
- [367] M. A. Ortiz, S. McClean, C. D. Nugent, and A. Castillo. Reducing appointment lead-time in an outpatient department of gynecology and obstetrics through discrete-event simulation and a case study. volume 10069 LNCS, pages 274–285. Springer Verlag, 2016.

- [368] M. Ortiz-Barrios and J. J. Alfaro-Saiz. An integrated approach for designing in-time and economically sustainable emergency care networks and a case study in the public sector. *PLoS One*, 15(6):e0234984, 2020.
- [369] M. Ortiz-Barrios, G. Jiménez-Delgado, S. McClean, and G. Polifroni-Avendaño. Using computer simulation for reducing the appointment lead-time in a public pediatric outpatient department. volume 11582 LNCS, pages 75–86. Springer Verlag, 2019.
- [370] M. Ortiz-Barrios, P. Lopez-Meza, S. McClean, and G. Polifroni-Avendaño. Discrete-event simulation for performance evaluation and improvement of gynecology outpatient departments and a case study in the public sector. volume 11582 LNCS, pages 101–112. Springer Verlag, 2019.
- [371] M. Ortiz-Barrios, P. Pancardo, G. Jiménez-Delgado, and J. De Ávila Villalobos. Applying multi-phase des approach for modelling the patient journey through accident and emergency departments. volume 11582 LNCS, pages 87–100. Springer Verlag, 2019.
- [372] M. Ortíz-Barrios, G. Jimenez-Delgado, and J. De Avila-Villalobos. A computer simulation approach to reduce appointment lead-time in outpatient perinatology departments and a case study in a maternal-child hospital. volume 10594 LNCS, pages 32–39. Springer Verlag, 2017.
- [373] Y. A. Ozcan, E. Tanfani, and A. Testi. A simulation-based modeling framework to deal with clinical pathways. pages 1190–1201.
- [374] M. Painchaud, V. Bélanger, and A. Ruiz. Discrete-event simulation of an intrahospital transportation service. volume 210, pages 233–244. Springer New York LLC.
- [375] C. Pan, D. Zhang, A. W. M. Kon, C. S. L. Wai, and W. B. Ang. Patient flow improvement for an ophthalmic specialist outpatient clinic with aid of discrete event simulation and design of experiment. *Health Care Management Science*, 18(2):137–155, 2015.
- [376] F. Pan, O. Reifsnider, Y. Zheng, I. Proskorovsky, T. Li, J. He, and S. V. Sorensen. Modeling clinical outcomes in prostate cancer and application and validation of the discrete event simulation approach. *Value in Health*, 21(4):416–422, 2018.
- [377] A. Patel, V. Berdunov, Z. Quayyum, D. King, M. Knapp, and R. Wittenberg. Estimated societal costs of stroke in the uk based on a discrete event simulation. *Age and Ageing*, 49(2):270–276, 2020.
- [378] J. A. Paul and A. Jotshi. Efficient operating room redesign through process improvement and optimal management of scheduled and emergent surgeries. *International Journal of Mathematics in Operational Research*, 5(3):317–344, 2013.
- [379] J. S. Peck, J. C. Benneyan, D. J. Nightingale, and S. A. Gaehde. Characterizing the value of predictive analytics in facilitating hospital patient flow. *IIE Transactions on Healthcare Systems Engineering*, 4(3):135–143, 2014.

- [380] F. Pegoraro, E. Alves Portela Santos, and E. de Freitas Rocha Loures. A support framework for decision making in emergency department management. *Computers and Industrial Engineering*, 146, 2020.
- [381] S. R. Pendharkar, D. P. Bischak, and P. Rogers. Evaluating healthcare systems with insufficient capacity to meet demand.
- [382] S. R. Pendharkar, D. P. Bischak, P. Rogers, W. Flemons, and T. W. Noseworthy. Using patient flow simulation to improve access at a multidisciplinary sleep centre. *Journal of Sleep Research*, 24(3):320–327, 2015.
- [383] M. L. Penn, T. Monks, A. A. Kazmierska, and M. R. A. R. Alkoheji. Towards generic modelling of hospital wards and reuse and redevelopment of simple models. *Journal of Simulation*, 14(2):107–118, 2020.
- [384] P. R. Pennathur, D. Cao, Z. Sui, L. Lin, A. M. Bisantz, R. J. Fairbanks, T. K. Guarrera, J. L. Brown, S. J. Perry, and R. L. Wears. Development of a simulation environment to study emergency department information technology. *Simulation in Healthcare*, 5(2):103–111, 2010.
- [385] B. Pennington, A. Filby, L. Owen, and M. Taylor. Smoking cessation and a comparison of two model structures. *PharmacoEconomics*, 36(9):1101–1112, 2018.
- [386] E. F. Pepler, J. Davidson, D. McGregor, K. Poore, S. Brown, and J. Pridie. Using simulation modelling to test the impact of future demand for end-of-life care. *Healthcare Management Forum*, 31(4):147–152, 2018.
- [387] I. T. Peres, S. Hamacher, F. L. Cyrino Oliveira, S. D. J. Barbosa, and F. Viegas. Simulation of appointment scheduling policies and a study in a bariatric clinic. *Obes Surg*, 29(9):2824–2830, 2019.
- [388] M. Persson, H. Hvitfeldt-Forsberg, M. Unbeck, O. G. Sköldenberg, A. Stark, P. Kelly-Pettersson, and P. Mazzocato. Operational strategies to manage non-elective orthopaedic surgical flows and a simulation modelling study. *BMJ Open*, 7(4):e013303, 2017.
- [389] R. Phan, V. Augusto, D. Martin, and M. Sarazin. Clinical pathway analysis using process mining and discrete-event simulation and an application to incisional hernia. volume 2019-December, pages 1172–1183. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [390] G. L. Plosker. Quetiapine and a pharmacoeconomic review of its use in bipolar disorder. *PharmacoEconomics*, 30(7):611–631, 2012.
- [391] K. Pongjetanapong, M. O’Sullivan, C. Walker, and N. Furian. Implementing complex task allocation in a cytology lab via hccm using flexsim hc. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 86:139–154, 2018.



- [392] S. T. Ponis, A. Delis, S. P. Gayialis, P. Kasimatis, and J. Tan. Applying discrete event simulation (des) in healthcare and the case for outpatient facility capacity planning. *International Journal of Healthcare Information Systems and Informatics*, 8(3):58–79, 2013.
- [393] A. Portnoy, S. Ozawa, S. Grewal, B. A. Norman, J. Rajgopal, K. M. Gorham, L. A. Haidari, S. T. Brown, and B. Y. Lee. Costs of vaccine programs across 94 low- and middle-income countries. *Vaccine*, 33(S1):A99–A108, 2015.
- [394] M. Poursoltan, M. Masmoudi, and P. Albert. Application of risk management for discrete event simulation projects in healthcare systems. *EMJ - Engineering Management Journal*, 2020.
- [395] L. Pradelli, M. Eandi, M. Povero, K. Mayer, M. Muscaritoli, A. R. Heller, and E. Fries-Schaffner. Cost-effectiveness of omega-3 fatty acid supplements in parenteral nutrition therapy in hospitals and a discrete event simulation model. *Clin Nutr*, 33(5):785–92, 2014.
- [396] L. Pradelli, S. Klek, K. Mayer, A. J. Omar Alsaleh, M. D. Rosenthal, A. R. Heller, and M. Muscaritoli. Cost-effectiveness of parenteral nutrition containing  $\omega$ -3 fatty acids in hospitalized adult patients from 5 european countries and the us. *JPEN J Parenter Enteral Nutr*, 2020.
- [397] M. Prettyjohns, R. Sandelin, S. Lister, and J. R. Norrefalk. A cost-utility study of the use of pregabalin added to usual care in refractory neuropathic pain patients in a swedish setting. *J Med Econ*, 15(6):1097–109, 2012.
- [398] N. C. Proudlove, S. Bisogno, B. S. S. Onggo, A. Calabrese, and N. Levialedi Ghiron. Towards fully-facilitated discrete event simulation modelling and addressing the model coding stage. *European Journal of Operational Research*, 263(2):583–595, 2017.
- [399] N. A. Pujowidianto, L. H. Lee, G. Pedrielli, C. H. Chen, and H. Li. Constrained optimizaton for hospital bed allocation via discrete event simulation with nested partitions. volume 0, pages 1916–1925. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [400] E. Pérez, L. Ntaimo, C. Bailey, and P. McCormack. Modeling and simulation of nuclear medicine patient service management in devs. *Simulation*, 86(8-9):481–501, 2010.
- [401] E. Pérez, B. Uyan, R. E. Rohde, H. Wehbe-Janek, A. K. Hochhalter, and S. H. Fenton. Assessing catheter-associated urinary tract infection prevention interventions in intensive care units and a discrete event simulation study. *IIEE Transactions on Healthcare Systems Engineering*, 7(1):43–52, 2017.
- [402] Y. Qiao, L. Ran, and J. Li. Optimization of teleconsultation using discrete-event simulation from a data-driven perspective. *Telemed J E Health*, 26(1):114–125, 2020.
- [403] Y. Qiu, J. Song, and Z. Liu. A simulation based ga for multi-objective optimization in patient flow distribution. volume 2014-January, pages 1–6. IEEE Computer Society.

- [404] Y. Qiu, J. Song, and Z. Liu. A simulation optimisation on the hierarchical health care delivery system patient flow based on multi-fidelity models. *International Journal of Production Research*, 54(21):6478–6493, 2016.
- [405] S. M. Qureshi, N. Purdy, A. Mohani, and W. P. Neumann. Predicting the effect of nurse-patient ratio on nurse workload and care quality using discrete event simulation. *J Nurs Manag*, 27(5):971–980, 2019.
- [406] V. A. Raghavan, V. Venkatadri, V. Kesavakumaran, S. Wang, M. Khasawneh, and K. Srihari. Reengineering the cardiac catheterization lab processes and a lean approach. *Journal of Healthcare Engineering*, 1(1):45–65, 2010.
- [407] J. Raphael, J. Helou, K. I. Pritchard, and D. M. Naimark. Palbociclib in hormone receptor positive advanced breast cancer and a cost-utility analysis. *European Journal of Cancer*, 85:146–154, 2017.
- [408] H. D. Reese, V. Anandhan, E. Perez, and C. Novoa. Improving patient waiting time at a pure walk-in clinic. pages 2764–2773. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [409] K. Reese, J. Avansino, M. Brumm, L. Martin, and T. E. Day. Determining future capacity for an ambulatory surgical center with discrete event simulation. *International Journal of Healthcare Management*, 2020.
- [410] O. S. Reifsnider, A. R. Kansal, J. Franke, J. Lee, J. T. George, M. Brueckmann, S. Kaspers, S. B. Brand, A. Ustyugova, S. Linden, M. Stargardt, and N. Hau. Cost-effectiveness of empagliflozin in the uk in an empa-reg outcome subgroup with type 2 diabetes and heart failure. *ESC Heart Fail*, 7(6):3910–8, 2020.
- [411] Y. Ren, M. Phan, P. Luong, J. Wu, D. Shell, C. D. Barras, H. K. Kok, M. Burney, B. Tahayori, H. M. Seah, J. Maingard, K. Zhou, A. Lamanna, A. Jhamb, V. Thijs, D. M. Brooks, and H. Asadi. Geographic service delivery for endovascular clot retrieval and using discrete event simulation to optimize resources. *World Neurosurg*, 141:e400–e413, 2020.
- [412] J. A. Restrepo-Morales, E. A. G. Betancur, and J. G. V. López. Customer service multichannel model in a health care service provider and a discrete simulation case study. *Innovar*, 29(72):89–102, 2019.
- [413] N. Revankar, A. J. Ward, C. G. Pelligra, T. Kongnakorn, W. Fan, and K. T. Lapensee. Modeling economic implications of alternative treatment strategies for acute bacterial skin and skin structure infections. *Journal of Medical Economics*, 17(10):730–740, 2014.
- [414] F. Riedewald, E. Byrne, and K. Cronin. Comparison of deterministic and stochastic simulation for capacity extension of high-purity water delivery systems. *PDA Journal of Pharmaceutical Science and Technology*, 65(4):404–424, 2011.
- [415] S. D. Roberts. Tutorial on the simulation of healthcare systems. pages 1403–1414.

- [416] S. Robinson, Z. J. Radnor, N. Burgess, and C. Worthington. Simlean and utilising simulation in the implementation of lean in healthcare. *European Journal of Operational Research*, 219(1):188–197, 2012.
- [417] T. Rohleder, T. Huschka, J. Egginton, D. O’Neil, and N. Woychick. Modeling care teams at mayo clinic. pages 2304–2314.
- [418] T. R. Rohleder, P. Lewkonja, D. P. Bischak, P. Duffy, and R. Hendijani. Using simulation modeling to improve patient flow at an outpatient orthopedic clinic. *Health Care Management Science*, 14(2):135–145, 2011.
- [419] K. Rotaru, L. Churilov, and A. Flitman. *Philosophical positioning of discrete-event simulation and system dynamics as management science tools for process systems and A critical realist perspective*, volume 9781118349021, pages 76–104. Wiley Blackwell, 2014.
- [420] Javad Rouzafzoon and Petri Helo. Developing service supply chains by using agent based simulation. *Industrial Management & Data Systems*, 116(2):255–270, 2016.
- [421] S. Roy, S. Prasanna Venkatesan, and M. Goh. Healthcare services and a systematic review of patient-centric logistics issues using simulation. *Journal of the Operational Research Society*, 2020.
- [422] C. F. Rusnock, E. W. Maxheimer, K. F. Oyama, and V. V. Valencia. Simulation-based evaluation of the effects of patient load on mental workload of healthcare staff. *Simulation in Healthcare*, 12(4):260–267, 2017.
- [423] M. H. Rutberg, S. Wenczel, J. Devaney, E. J. Goldlust, and T. E. Day. Incorporating discrete event simulation into quality improvement efforts in health care systems. *Am J Med Qual*, 30(1):31–5, 2015.
- [424] M. Sadatsafavi, S. Ghanbarian, A. Adibi, K. Johnson, J. M. FitzGerald, W. Flanagan, S. Bryan, D. Sin, and Network for the Canadian Respiratory Research. Development and validation of the evaluation platform in copd (epic) and a population-based outcomes model of copd for canada. *Medical Decision Making*, 39(2):152–167, 2019.
- [425] S. Salleh, P. Thokala, A. Brennan, R. Hughes, and S. Dixon. Discrete event simulation-based resource modelling in health technology assessment. *PharmacoEconomics*, 35(10):989–1006, 2017.
- [426] N. Salmanzadeh-Meydani, S. M. T. Fatemi-Ghomi, and A. Sabbaghnia. Improving the mean waiting time of patients by by simulation in a health service provision clinic. pages 260–266. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [427] A. Salmon, S. Rachuba, S. Briscoe, and M. Pitt. A structured literature review of simulation modelling applied to emergency departments and current patterns and emerging trends. *Operations Research for Health Care*, 19:1–13, 2018.

- [428] A. Santosa, M. Sagathi, and M. R. Situmorang. Simulation of first level health care facilities to reduce patient flow time. volume 662. Institute of Physics Publishing.
- [429] M. Schlueter, E. Finn, S. Díaz, T. Dilla, J. Inciarte-Mundo, and W. Fakhouri. Cost-effectiveness analysis of baricitinib versus adalimumab for the treatment of moderate-to-severe rheumatoid arthritis in Spain. *ClinicoEconomics and Outcomes Research*, 11:395–403, 2019.
- [430] R. Schmidt, S. Geisler, and C. Spreckelsen. Decision support for hospital bed management using adaptable individual length of stay estimations and shared resources. *BMC Med Inform Decis Mak*, 13:3, 2013.
- [431] J. Schroettner and A. Lassnig. Simulation model for cost estimation of integrated care concepts of heart failure patients. *Health Economics Review*, 3(1):1–11, 2013.
- [432] H. J. Schütz and R. Kolisch. Approximate dynamic programming for capacity allocation in the service industry. *European Journal of Operational Research*, 218(1):239–250, 2012.
- [433] B. Shahverdi, M. Tariverdi, and E. Miller-Hooks. Assessing hospital system resilience to disaster events involving physical damage and demand surge. *Socio-Economic Planning Sciences*, 70, 2020.
- [434] M. Shakoor, M. Al-Nasra, W. Abu Jadayil, N. Jaber, and S. Abu Jadayil. Evaluation of provided services at MRI department in a public hospital using discrete event simulation technique and a case study. *Cogent Engineering*, 4(1), 2017.
- [435] M. Shakoor, M. Al-Nasra, W. Abu Jadayil, N. Jaber, and M. Qureshi. A simulation model for performance evaluation of resources in a radiology department. *International Journal of Healthcare Management*, pages 1–8, 2017.
- [436] Mwafak Shakoor, Mohamed Rafik Qureshi, Wisam Abu Jadayil, Nasser Jaber, and Moayyad Al-Nasra. Application of discrete event simulation for performance evaluation in private healthcare and the case of a radiology department. *International Journal of Healthcare Management*, 2020.
- [437] S. Y. Shin, Y. Brun, H. Balasubramanian, P. L. Henneman, and L. J. Osterweil. Resource scheduling through resource-aware simulation of emergency departments. pages 64–70.
- [438] S. Y. Shin, Y. Brun, L. J. Osterweil, H. Balasubramanian, and P. L. Henneman. Resource specification for prototyping human-intensive systems. volume 9033, pages 332–346. Springer Verlag, 2015.
- [439] N. Shukla, J. E. Keast, and D. Ceglarek. Role activity diagram-based discrete event simulation model for healthcare service delivery processes. *International Journal of Systems Science and Operations and Logistics*, 4(1):68–83, 2017.

- [440] S. Siddiqui, E. Morse, and S. Levin. Evaluating nurse staffing levels in perianesthesia care units using discrete event simulation. *IISE Transactions on Healthcare Systems Engineering*, 7(4):215–223, 2017.
- [441] K. N. Simpson, P. P. Pei, J. Möller, R. W. Baran, B. Dietz, W. Woodward, K. Migliaccio-Walle, and J. J. Caro. Lopinavir/ritonavir versus darunavir plus ritonavir for hiv infection and a cost-effectiveness analysis for the united states. *Pharmacoeconomics*, 31(5):427–444, 2013.
- [442] Y. W. Simwita and B. I. Helgheim. Improving surgeon utilization in an orthopedic department using simulation modeling. *J Healthc Leadersh*, 8:41–50, 2016.
- [443] Y. W. Simwita and B. I. Helgheim. Simulation analysis of resource flexibility on healthcare processes. *J Multidiscip Healthc*, 9:519–528, 2016.
- [444] B. Sobolev, V. Sanchez, and L. Kuramoto. *Health care evaluation using computer simulation and Concepts, methods, and applications*. Health Care Evaluation Using Computer Simulation and Concepts, Methods, and Applications. Springer US, 2012.
- [445] S. V. Sorensen, S. Peng, B. U. Monz, C. Bradley-Kennedy, and A. R. Kansal. A comparative analysis of models used to evaluate the cost-effectiveness of dabigatran versus warfarin for the prevention of stroke in atrial fibrillation. *Pharmacoeconomics*, 31(7):589–604, 2013.
- [446] M. Soto-Gordoa, A. Arrospe, F. Moreno-Izco, P. Martínez-Lage, I. Castilla, and J. Mar. Projecting burden of dementia in spain, 2010-2050 and impact of modifying risk factors. *J Alzheimers Dis*, 48(3):721–30, 2015.
- [447] P. B. Southard, C. Chandra, and S. Kumar. Rfid in healthcare and a six sigma dmaic and simulation case study. *Int J Health Care Qual Assur*, 25(4):291–321, 2012.
- [448] L. Standfield, T. Comans, and P. Scuffham. Markov modeling and discrete event simulation in health care and a systematic comparison. *Int J Technol Assess Health Care*, 30(2):165–72, 2014.
- [449] L. Standfield, T. Comans, and P. A. Scuffham. Simulation of health care and related costs in people with dementia in australia. *Aust Health Rev*, 43(5):531–539, 2019.
- [450] L. B. Standfield, T. A. Comans, and P. A. Scuffham. An empirical comparison of markov cohort modeling and discrete event simulation in a capacity-constrained health care setting. *Eur J Health Econ*, 18(1):33–47, 2017.
- [451] D. A. Steward, R. A. Hoffer, C. Thaldorf, and D. E. Milov. A method for understanding some consequences of bringing patient-generated data into health care delivery. *Medical Decision Making*, 30(4):E1–E13, 2010.
- [452] N. Suhaimi, V. Vahdat, and J. Griffin. Building a flexible simulation model for modeling multiple outpatient orthopedic clinics. volume 2018-December, pages 2612–2623. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

- [453] E. Sulis, I. A. Amantea, and G. Fornero. Risk-aware business process modeling and a comparison of discrete event and agent-based approaches. volume 2019-December, pages 3152–3159. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [454] Emilio Sulis, Pietro Terna, Antonio Di Leva, Guido Boella, and Adriana Boccuzzi. Agent-oriented decision support system for business processes management with genetic algorithm optimization and an application in healthcare. *Journal of Medical Systems*, 44(9), 2020.
- [455] M. J. Sweeting, K. L. Masconi, E. Jones, P. Ulug, M. J. Glover, J. A. Michaels, M. J. Bown, J. T. Powell, and S. G. Thompson. Analysis of clinical benefit, harms, and cost-effectiveness of screening women for abdominal aortic aneurysm. *The Lancet*, 392(10146):487–495, 2018.
- [456] J. Taheri, Z. Gellad, D. Burchfield, and K. Cooper. Simulation as a guide for systems redesign in gastrointestinal endoscopy and appointment template redesign. pages 2204–2214.
- [457] A. A. Tako and K. Kotiadis. Participative simulation (partisim) and a facilitated simulation approach for stakeholder engagement. volume 2018-December, pages 192–206. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [458] A. A. Tako and K. Kotiadis. Partisim and a multi-methodology framework to support facilitated simulation modelling in healthcare. *European Journal of Operational Research*, 244(2):555–564, 2015.
- [459] O. Tamburis. Bridging the gap between process mining and des modeling in the healthcare domain. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [460] O. Tamburis and C. Esposito. Process mining as support to simulation modeling and a hospital-based case study. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 104, 2020.
- [461] A. Tarhini, A. Benedict, D. McDermott, S. Rao, A. Ambavane, K. Gupte-Singh, J. Sabater, C. Ritchings, V. Aponte-Ribero, M. M. Regan, and M. Atkins. Sequential treatment approaches in the management of braf wild-type advanced melanoma and a cost-effectiveness analysis. *Immunotherapy*, 10(14):1241–1252, 2018.
- [462] S. J. E. Taylor, P. Abbott, T. Young, and R. Grocott-Mason. Student modeling & simulation projects in healthcare and experiences with hillington hospital. volume 2015-January, pages 3650–3661. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [463] S. J. E. Taylor, S. J. Turner, S. Strassburger, and N. Mustafee. Bridging the gap and a standards-based approach to or/ms distributed simulation. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 22(4), 2012.
- [464] J. J. Tejada, J. S. Ivy, R. E. King, J. R. Wilson, M. J. Ballan, M. G. Kay, K. M. Diehl, and B. C. Yankaskas. Combined des/sd model of breast cancer screening for older women, ii and screening-and-treatment simulation. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 46(7):707–727, 2014.

- [465] N. X. Thanh, J. A. Ezekowitz, D. T. Tran, and P. Kaul. Cost effectiveness of eplerenone for the treatment of systolic heart failure with mild symptoms in alberta, canada. *Am J Cardiovasc Drugs*, 16(5):365–76, 2016.
- [466] H. Toro-Díaz, M. E. Mayorga, A. S. Barritt, E. S. Orman, and S. B. Wheeler. Predicting liver transplant capacity using discrete event simulation. *Medical Decision Making*, 35(6):784–796, 2015.
- [467] A. Tran-Duy, A. Boonen, W. Kievit, P. L. C. M. van Riel, M. A. F. J. van de Laar, and J. L. Severens. Modelling outcomes of complex treatment strategies following a clinical guideline for treatment decisions in patients with rheumatoid arthritis. *Pharmacoeconomics*, 32(10):1015–1028, 2014.
- [468] A. Tran-Duy, A. Boonen, M. A. F. J. Van De Laar, A. C. Franke, and J. L. Severens. A discrete event modelling framework for simulation of long-term outcomes of sequential treatment strategies for ankylosing spondylitis. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 70(12):2111–2118, 2011.
- [469] M. Treur, E. Baca, J. Bobes, F. Cañas, L. Salvador, B. Gonzalez, and B. Heeg. The cost-effectiveness of paliperidone extended release in spain. *Journal of Medical Economics*, 15(SUPPL. 1):26–34, 2012.
- [470] S. Tully, Z. Feng, K. Grindrod, T. McFarlane, K. K. W. Chan, and W. W. L. Wong. Impact of increasing wait times on overall mortality of chimeric antigen receptor t-cell therapy in large b-cell lymphoma and a discrete event simulation model. *JCO Clin Cancer Inform*, 3:1–9, 2019.
- [471] M. Tuson, T. England, D. Behrens, R. Bowen, D. Edwards, J. Frankish, and J. Kay. Modelling for the proposed roll-out of the ‘111’ service in wales and a case study. *Health Care Management Science*, 21(2):159–176, 2018.
- [472] A. G. Uriarte, E. R. Zúñiga, M. U. Moris, and A. H. C. Ng. System design and improvement of an emergency department using simulation-based multi-objective optimization. volume 616. Institute of Physics Publishing.
- [473] W. J. Valentine, K. Van Brunt, K. S. Boye, and R. F. Pollock. Treating type 1 diabetes mellitus with a rapid-acting analog insulin regimen vs. regular human insulin in germany and a long-term cost-effectiveness evaluation. *Applied Health Economics and Health Policy*, 16(3):357–366, 2018.
- [474] M. Van Buuren, G. J. Kommer, R. Van Der Mei, and S. Bhulai. A simulation model for emergency medical services call centers. volume 2016-February, pages 844–855. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [475] M. van Buuren, G. J. Kommer, R. van der Mei, and S. Bhulai. Ems call center models with and without function differentiation and a comparison. *Operations Research for Health Care*, 12:16–28, 2017.

- [476] A. Van Gestel, C. A. Webers, J. L. Severens, H. J. Beckers, N. M. Jansonius, F. Hendrikse, and J. S. Schouten. The long-term outcomes of four alternative treatment strategies for primary open-angle glaucoma. *Acta Ophthalmologica*, 90(1):20–31, 2012.
- [477] C. D. M. van Karnebeek, T. Mohammadi, N. Tsao, G. Sinclair, S. Sirrs, S. Stockler, and C. Marra. Health economic evaluation of plasma oxysterol screening in the diagnosis of niemann-pick type c disease among intellectually disabled using discrete event simulation. *Molecular Genetics and Metabolism*, 114(2):226–232, 2015.
- [478] J. van Rosmalen, M. Toy, and J. F. O’Mahony. A mathematical approach for evaluating markov models in continuous time without discrete-event simulation. *Med Decis Making*, 33(6):767–79, 2013.
- [479] S. Vanderby and M. W. Carter. An evaluation of the applicability of system dynamics to patient flow modelling. *Journal of the Operational Research Society*, 61(11):1572–1581, 2010.
- [480] H. M. Vasiliadis, A. Dezetter, E. Latimer, M. Drapeau, and A. Lesage. Assessing the costs and benefits of insuring psychological services as part of medicare for depression in canada. *Psychiatr Serv*, 68(9):899–906, 2017.
- [481] A. L. Vataire, S. Aballéa, F. Antonanzas, L. H. Roijen, R. W. Lam, P. McCrone, U. Persson, and M. Toumi. Core discrete event simulation model for the evaluation of health care technologies in major depressive disorder. *Value Health*, 17(2):183–95, 2014.
- [482] V. Venugopal, L. Daniel Otero, C. E. Otero, and G. Centeno. A simulation model for evaluating resource policies in a major emergency department.
- [483] C. R. Verjan, V. Augusto, X. Xie, and V. Buthion. Economic comparison between hospital at home and traditional hospitalization using a simulation-based approach. *Journal of Enterprise Information Management*, 26(1):135–153, 2013.
- [484] J. Viana. Reflections on two approaches to hybrid simulation in healthcare. volume 2015-January, pages 1585–1596. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [485] J. Viana, S. C. Brailsford, V. Harindra, and P. R. Harper. Combining discrete-event simulation and system dynamics in a healthcare setting and a composite model for chlamydia infection. *European Journal of Operational Research*, 237(1):196–206, 2014.
- [486] I. T. Vieira, R. C. H. Cheng, P. R. Harper, and V. de Senna. Small world network models of the dynamics of hiv infection. *Annals of Operations Research*, 178(1):173–200, 2010.
- [487] I. T. Vieira, V. de Senna, and H. B. B. Pereira. A small world model for the spread of hiv infection. *Pesquisa Operacional*, 31(2):373–389, 2011.
- [488] A. Virtue, J. Kelly, and T. Chausalet. Using simplified discrete-event simulation models for health care applications. pages 1154–1165.



- [489] B. Von Schéele, J. Mauskopf, T. H. Brodtkorb, C. Ainsworth, C. G. Berardo, and A. Patel. Relationship between modeling technique and reported outcomes and case studies in models for the treatment of schizophrenia. *Expert Review of Pharmacoeconomics and Outcomes Research*, 14(2):235–257, 2014.
- [490] X. Wan, Y. Zhang, J. Ma, C. Tan, X. Zeng, and L. Peng. Ribociclib in hormone-receptor-positive advanced breast cancer and establishing a value-based cost in china. *Breast*, 43:1–6, 2019.
- [491] H. I. Wang, E. Roman, S. Crouch, E. Aas, C. Burton, R. Patmore, and A. Smith. A generic model for follicular lymphoma and predicting cost, life expectancy, and quality-adjusted-life-year using uk population-based observational data. *Value in Health*, 21(10):1176–1185, 2018.
- [492] H. I. Wang, A. Smith, E. Aas, E. Roman, S. Crouch, C. Burton, and R. Patmore. Treatment cost and life expectancy of diffuse large b-cell lymphoma (dlbcl) and a discrete event simulation model on a uk population-based observational cohort. *European Journal of Health Economics*, 18(2):255–267, 2017.
- [493] C. Y. Wei, R. G. W. Quek, G. Villa, S. R. Gandra, C. A. Forbes, S. Ryder, N. Armstrong, S. Deshpande, S. Duffy, J. Kleijnen, and P. Lindgren. A systematic review of cardiovascular outcomes-based cost-effectiveness analyses of lipid-lowering therapies. *Pharmacoeconomics*, 35(3):297–318, 2017.
- [494] S. J. Weng, B. S. Tsai, L. M. Wang, C. Y. Chang, and D. Gotcher. Using simulation and data envelopment analysis in optimal healthcare efficiency allocations. pages 1295–1305.
- [495] Denise L. White, Craig M. Froehle, and Kenneth J. Klassen. The effect of integrated scheduling and capacity policies on clinical efficiency. *Production and Operations Management*, 20(3):442–455, 2011.
- [496] R. C. Wielage, J. A. Myers, R. W. Klein, and M. Happich. Cost-effectiveness analyses of osteoarthritis oral therapies and a systematic review. *Appl Health Econ Health Policy*, 11(6):593–618, 2013.
- [497] E. Williams, T. Szakmany, I. Spernaes, B. Muthuswamy, and P. Holborn. Discrete-event simulation modeling of critical care flow and new hospital, old challenges. *Crit Care Explor*, 2(9):e0174, 2020.
- [498] E. J. Williams and O. M. Ülgen. *Simulation applications in the automotive industry*, volume 9783642287770, pages 45–58. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
- [499] K. A. Williams, C. G. Chambers, M. Dada, P. J. Christo, D. Hough, R. Aron, and J. A. Ulatowski. Applying jit principles to resident education to reduce patient delays and a pilot study in an academic medical center pain clinic. *Pain Medicine (United States)*, 16(2):312–318, 2015.

- [500] K. A. Williams, C. G. Chambers, M. Dada, D. Hough, R. Aron, and J. A. Ulatowski. Using process analysis to assess the impact of medical education on the delivery of pain services and a natural experiment. *Anesthesiology*, 116(4):931–939, 2012.
- [501] A. M. Wilson, K. A. Reynolds, M. P. Verhougstraete, and R. A. Canales. Validation of a stochastic discrete event model predicting virus concentration on nurse hands. *Risk Analysis*, 39(8):1812–1824, 2019.
- [502] R. M. Wood, C. J. McWilliams, M. J. Thomas, C. P. Bourdeaux, and C. Vasilakis. Covid-19 scenario modelling for the mitigation of capacity-dependent deaths in intensive care. *Health Care Manag Sci*, 23(3):315–324, 2020.
- [503] G. H. Wu, J. Gao, C. Y. Ji, L. Pradelli, Q. L. Xi, and Q. L. Zhuang. Cost and effectiveness of omega-3 fatty acid supplementation in chinese icu patients receiving parenteral nutrition. *Clinicoecon Outcomes Res*, 7:369–75, 2015.
- [504] J. G. Xenakis, E. T. Kinter, K. J. Ishak, A. J. Ward, J. P. Marton, R. J. Willke, S. Davies, and J. J. Caro. A discrete-event simulation of smoking-cessation strategies based on varenicline pivotal trial data. *PharmacoEconomics*, 29(6):497–510, 2011.
- [505] W. Xiong, A. Bair, C. Sandrock, S. Wang, J. Siddiqui, and N. Hupert. Implementing telemedicine in medical emergency response and concept of operation for a regional telemedicine hub. *Journal of Medical Systems*, 36(3):1651–1660, 2012.
- [506] K. K. Yang, S. S. W. Lam, J. M. W. Low, and M. E. H. Ong. Managing emergency department crowding through improved triaging and resource allocation. *Operations Research for Health Care*, 10:13–22, 2016.
- [507] Z. Yi, M. E. Mayorga, E. S. Orman, S. B. Wheeler, P. H. Hayashi, and A. S. Barritt. Trends in characteristics of patients listed for liver transplantation will lead to higher rates of waitlist removal due to clinical deterioration. *Transplantation*, 101(10):2368–2374, 2017.
- [508] K. Yip, L. Leung, and D. Yeung. Levelling bed occupancy and reconfiguring surgery schedules via simulation. *Int J Health Care Qual Assur*, 31(7):864–876, 2018.
- [509] M. Yokouchi, S. Aoki, H. Sang, R. Zhao, and S. Takakuwa. Operations analysis and appointment scheduling for an outpatient chemotherapy department.
- [510] J. H. Youn, M. D. Stevenson, P. Thokala, K. Payne, and M. Goddard. Modeling the economic impact of interventions for older populations with multimorbidity and a method of linking multiple single-disease models. *Med Decis Making*, 39(7):842–856, 2019.
- [511] T. Young, S. Soorapanth, J. Wilkerson, L. Millburg, T. Roberts, and D. Morgareidge. The costs and value of modelling-based design in healthcare delivery and five case studies from the us. *Health Systems*, 9(3):253–262, 2020.

- [512] J. Zabawa and B. Mielczarek. Overcoming challenges in hybrid simulation design and experiment. volume 853, pages 207–217. Springer Verlag, 2019.
- [513] O. O. Zanela, H. A. Cabra, G. Meléndez, P. Anaya, and F. Rupprecht. Economic evaluation of bariatric surgery in mexico using discrete event simulation. *Value in Health Regional Issues*, 1(2):172–179, 2012.
- [514] B. P. Zeigler. Discrete event system specification framework for self-improving healthcare service systems. *IEEE Systems Journal*, 12(1):196–207, 2018.
- [515] F. Zeinali, M. Mahootchi, and M. M. Sepehri. Resource planning in the emergency departments and a simulation-based metamodeling approach. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 53:123–138, 2015.
- [516] M. Zeinalnezhad, A. G. Chofreh, F. A. Goni, J. J. Klemeš, and E. Sari. Simulation and improvement of patients’ workflow in heart clinics during covid-19 pandemic using timed coloured petri nets. *Int J Environ Res Public Health*, 17(22), 2020.
- [517] C. Zhang, H. Hanchi, and S. Meijer. Evaluating the effect of centralized administration on health care performances using discrete-event simulation. volume 2017-January, pages 1–6. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [518] T. Zhang, E. Marcon, and M. Di Mascolo. A decision support tool for deploying chemotherapy at home activity.
- [519] X. Zhang. Application of discrete event simulation in health care and a systematic review. *BMC Health Serv Res*, 18(1):687, 2018.
- [520] X. Zhang, S. K. Lhachimi, and W. H. Rogowski. Reporting quality of discrete event simulations in healthcare—results from a generic reporting checklist. *Value in Health*, 23(4):506–514, 2020.
- [521] Y. Zhang and M. L. Puterman. Developing an adaptive policy for long-term care capacity planning. *Health Care Management Science*, 16(3):271–279, 2013.
- [522] X. Zhong, M. Williams, J. Li, S. A. Kraft, and J. S. Sleeth. Primary care redesign and a simulation study at a pediatric clinic. volume 2014-January, pages 546–551. IEEE Computer Society.
- [523] Z. Zhou, Y. Wang, and L. Li. Process mining based modeling and analysis of workflows in clinical care - a case study in a chicago outpatient clinic. pages 590–595. IEEE Computer Society.
- [524] Z. Zhu. Impact of different discharge patterns on bed occupancy rate and bed waiting time and a simulation approach. *J Med Eng Technol*, 35(6-7):338–43, 2011.
- [525] Z. Zhu, B. H. Hen, and K. L. Teow. Estimating icu bed capacity using discrete event simulation. *Int J Health Care Qual Assur*, 25(2):134–44, 2012.

- [526] L. P. Zhuhadar and E. Thrasher. Data analytics and its advantages for addressing the complexity of healthcare and a simulated zika case study example. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(11), 2019.
- [527] J. Zulkepli and T. Eldabi. Developing integrated patient pathways using hybrid simulation. volume 1782. American Institute of Physics Inc.
- [528] J. Zulkepli and T. Eldabi. Towards a framework for conceptual model hybridization in healthcare. volume 2016-February, pages 1597–1608. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [529] J. Zulkepli, T. Eldabi, and N. Mustafee. Hybrid simulation for modelling large systems and an example of integrated care model.