

**Departament d'Arquitectura de  
Computadors i Sistemes Operatius**

**Máster en Ciencia e Ingeniería Computacional**

**Simulación de departamentos de  
urgencias empleando un modelo  
basado en agentes**

Memoria del trabajo de investigación del “Máster en Ciencia e Ingeniería Computacional”, realizada por Hayden Duncan Stainsby, bajo la dirección del Dr. Emilio Luque. Escuela de Ingeniería (Departamento de Arquitectura de Computadores y Sistemas Operativos)

Barcelona, Julio de 2010



Trabajo de investigación  
Máster en Ciencia e Ingeniería Computacional  
Curso 2008-2010

# **Simulación de departamentos de urgencias empleando un modelo basado en agentes**

*Autor*  
**Hayden Duncan Stainsby**

*Director*  
**Emilio Luque**

Departamento de Arquitectura de Computadores y Sistemas Operativos  
Escuela de Ingeniería  
Universidad Autónoma de Barcelona

Firma autor

Firma director



# Resumen

Los servicios de salud son sistemas muy complejos, pero de alta importancia, especialmente en algunos momentos críticos, en todo el mundo. Los departamentos de urgencias pueden ser una de las áreas más dinámicas y cambiables de todos los servicios de salud y a la vez más vulnerable a dichos cambios. La mejora de esos departamentos se puede considerar uno de los grandes retos que tiene cualquier administrador de un hospital, y la simulación provee una manera de examinar este sistema tan complejo sin poner en peligro los pacientes que son atendidos.

El objetivo de este trabajo ha sido el modelado de un departamento de urgencias y el desarrollo de un simulador que implementa este modelo con la finalidad de explorar el comportamiento y las características de dicho servicio de urgencias. El uso del simulador ofrece la posibilidad de visualizar el comportamiento del modelo con diferentes parámetros y servirá como núcleo de un sistema de ayuda a la toma de decisiones que pueda ser usado en departamentos de urgencias.

El modelo se ha desarrollado con técnicas de modelado basado en agentes (ABM) que permiten crear modelos funcionalmente más próximos a la realidad que los modelos de colas o de dinámicas de sistemas, al permitir la inclusión de la singularidad que implica el modelado a nivel de las personas. Los agentes del modelo presentado, descritos internamente como máquinas de estados, representan a todo el personal del departamento de urgencias y los pacientes que usan este servicio. Un análisis del modelo a través de su implementación en el simulador muestra que el sistema se comporta de manera semejante a un departamento de urgencias real.

**Palabras claves:** Modelos basados en agentes, simulación, departamentos de urgencias, ciencia computacional.

# Resum

Els serveis de salut són sistemes molt complexos, però d'alta importància, especialment en alguns moments crítics, a tot el món. Els departaments d'urgències poden ser una de les àrees més dinàmiques i canviables de tots els serveis de salut i alhora més vulnerable a aquests canvis. La millora d'aquests departaments es pot considerar un dels grans reptes que té qualsevol administrador d'un hospital i la simulació proveeix una manera d'examinar aquest sistema tan complex sense posar en perill els pacients que són atesos.

L'objectiu d'aquest treball ha estat el modelat d'un departament d'urgències i el desenvolupament d'un simulador que implementa aquest model amb la finalitat d'explorar el comportament i les característiques de l'esmentat servei d'urgències. L'ús del simulador ofereix la possibilitat de visualitzar el comportament del model amb diferents paràmetres i servirà com a nucli d'un sistema d'ajuda a la presa de decisions que pugui ser usat en departaments d'urgències.

El model s'ha desenvolupat amb tècniques de modelatge basat en agents (ABM) que permeten crear models funcionalment més propers a la realitat que els models de cues o de dinàmiques de sistemes, en permetre la inclusió de la singularitat que implica el modelatge a nivell de les persones. Els agents del model presentat, descrits internament com màquines d'estats, representen a tot el personal del departament d'urgències i els pacients que usen aquest servei. Una anàlisi del model a través de la seva implementació en el simulador mostra que el sistema es comporta de manera semblant a un departament d'urgències real.

**Paraules clau:** Models basats en agents, simulació, departaments d'urgències, ciència computacional.

# Abstract

Healthcare services are complex, but very important systems throughout the world, especially so in certain critical moments. Emergency departments could be one of the most dynamic and changeable areas in healthcare and also the most vulnerable to change. The improvement of these emergency departments can be considered one of the great challenges which any hospital administrator has, and simulation provides a method to examine this complex system without putting the lives of the patients at risk.

The objective of this work has been to model an emergency department and develop a simulator which implements this model, with the goal of exploring the behaviour and the characteristics of this emergency service. The use of this simulator offers the possibility of visualising the model's behaviour with different parameters and will serve as the nucleus of a decision support system which can be used in an emergency department.

The model has been developed using Agent-Based Modelling (ABM) techniques which permit the creation of models that are functionally closer to reality than models based on queue theory or system dynamics, allowing the inclusion of the individuality which modelling people implies. The presented model's agents, described internally by state machines, represent all the department staff as well as the patients who use the service. An analysis of the model performed through the simulator implementation shows that the system behaves in a similar manner to a real emergency department.

**Keywords:** Agent-based models, simulation, emergency departments, computational science



# Agradecimientos

**To Thea, Bruce, and Evan;**  
who inspired me to not just go and see the world, but to live it

**A Emilio y Lola;**  
quienes me aceptaron a CAOS, aunque “volví loco” más tarde

**A todo el grupo de simulación;**  
por toda la ayuda, especialmente durante la tesina

**A todo mis compañeros de CAOS;**  
los último dos años de medio han sido muy divertidos

**A Alvaro, Gonza, Claudia, y Moni;**  
por las correcciones a la tesina, pero aún más por ser mis amigos

**Y a Andrea;**  
por el apoyo muto en los últimos meses, y por dejarme poner mi  
nombre en “su tesina”

*¡Gracias!*



# Índice general

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Ciencia computacional . . . . .	2
1.2	Problema . . . . .	3
1.3	Objetivo . . . . .	4
1.3.1	Corto plazo . . . . .	4
1.3.2	Largo plazo . . . . .	4
1.4	Metodología de desarrollo . . . . .	5
1.5	Organización de la memoria . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Modelos Basados en Agentes de la Interacción Sociológica</b>	<b>9</b>
2.1	Modelos Basados en Agentes . . . . .	9
2.1.1	Definición . . . . .	9
2.1.2	Representación de agentes . . . . .	11
2.1.3	Representación del entorno . . . . .	11
2.2	Comparación con otras técnicas de modelado . . . . .	12
2.2.1	Ventajas de modelos basados en agentes . . . . .	12
2.2.2	Desventajas de modelos basados en agentes . . . . .	12
2.3	Ámbitos de uso . . . . .	13
2.3.1	Modelos basados en agentes en sociología . . . . .	13
2.4	Como construir un modelo basado en agentes . . . . .	15
2.4.1	El objetivo . . . . .	15
2.4.2	Los agentes . . . . .	16
2.4.3	El entorno . . . . .	16
2.4.4	Las interacciones . . . . .	17
<b>3</b>	<b>La simulación en el ámbito de salud</b>	<b>19</b>
3.1	Simulación de sistemas de gestión en el ámbito de salud . . . . .	19
3.1.1	Retos de la simulación en salud . . . . .	19
3.1.2	Taxonomía de modelos en salud . . . . .	21
3.2	Simulación de departamentos de urgencias . . . . .	23
3.2.1	Usos de simulación . . . . .	23

3.2.2	Técnicas de simulación . . . . .	24
3.3	Trabajo relacionado . . . . .	26
<b>4</b>	<b>Modelo de Departamentos de Urgencias</b>	<b>31</b>
4.1	Los agentes . . . . .	31
4.2	Los agentes activos . . . . .	32
4.2.1	Máquinas de estado . . . . .	35
4.2.2	VARIABLES DE ESTADO . . . . .	36
4.2.3	OBSERVABILIDAD DE VARIABLES . . . . .	36
4.2.4	ENTRADAS . . . . .	43
4.2.5	SALIDAS . . . . .	43
4.2.6	TABLA DE TRANSICIONES . . . . .	44
4.3	Los agentes pasivos . . . . .	47
4.3.1	SISTEMA INFORMÁTICO . . . . .	47
4.3.2	ALTAVOCES . . . . .	49
4.3.3	TUBOS NEUMÁTICOS . . . . .	50
4.3.4	LABORATORIOS . . . . .	51
4.4	La comunicación . . . . .	52
4.4.1	Modelos de comunicación . . . . .	52
4.4.2	Comunicación pasiva . . . . .	54
4.4.3	Estructura de un mensaje . . . . .	55
4.4.4	Agentes pasivos como extensiones al modelo de comunicación . . . . .	56
4.5	El entorno . . . . .	56
4.5.1	Granularidad de los lugares . . . . .	56
4.5.2	Lugares de interacción . . . . .	57
<b>5</b>	<b>Simulador</b>	<b>61</b>
5.1	El modelo implementado . . . . .	61
5.1.1	La reducción de complejidad . . . . .	61
5.2	Algoritmo . . . . .	62
5.2.1	Cambiar estado . . . . .	62
5.2.2	Salida . . . . .	63
5.3	Máquina de simulación . . . . .	63
5.3.1	Generador de números aleatorios . . . . .	64
5.4	IMPLEMENTACIÓN DE LA MÁQUINA DE ESTADOS . . . . .	64
5.4.1	TIEMPO EN LA SIMULACIÓN . . . . .	66
5.5	INTERFAZ GRÁFICA . . . . .	66
5.6	Simulaciones paramétricas . . . . .	69
5.6.1	LA NECESIDAD DE SIMULACIONES PARAMÉTRICAS . . . . .	69
5.6.2	BEHAVIOURSPACE . . . . .	69

<b>6 Validación y Análisis</b>	<b>71</b>
6.1 Validación . . . . .	71
6.1.1 Próximo estado basado en la entrada recibida . . . . .	72
6.1.2 Salida basada en el estado actual . . . . .	72
6.2 Análisis . . . . .	73
6.2.1 Número de repeticiones . . . . .	74
6.2.2 Índices . . . . .	74
6.2.3 Rangos de parámetros . . . . .	76
6.2.4 Tiempo para alcanzar el régimen estacionario . . . . .	77
6.2.5 Comportamiento con semillas diferentes . . . . .	78
6.2.6 Sensibilidad de los parámetros . . . . .	82
<b>7 Conclusiones</b>	<b>91</b>
7.1 Conclusiones . . . . .	91
7.2 Líneas abiertas . . . . .	92
7.2.1 Sintonización del modelo . . . . .	93
7.2.2 Optimización del sistema . . . . .	93



# Índice de figuras

1.1	La ciencia computacional se sitúa en la intersección de la matemática, la ciencia, y la informática . . . . .	2
1.2	Cinco fases del modelo de desarrollo usado . . . . .	5
3.1	Consideraciones de modelos del nivel 1 . . . . .	21
3.2	Consideraciones de modelos del nivel 2 . . . . .	22
3.3	Consideraciones de modelos del nivel 3 . . . . .	22
4.1	Tipos de máquinas de estados . . . . .	36
4.2	Pesos de probabilidad individuales . . . . .	46
4.3	Tipos de comunicación . . . . .	53
4.4	La llegada de un nuevo paciente resulta en una comunicación pasiva . . . . .	54
4.5	Representación del entorno . . . . .	57
4.6	Representación del entorno como interconexión . . . . .	58
5.1	Interfaz de NetLogo (con simulador corriendo) . . . . .	67
5.2	Interfaz gráfica del simulador . . . . .	67
6.1	Factor del número de pacientes por hora . . . . .	77
6.2	Población de pacientes estableciendo al principio de la ejecución . . . . .	78
6.3	Distribución del índice de tiempo de atención por repetición . . . . .	79
6.4	Distribución del índice de tiempo en la primera sala de espera por repetición . . . . .	79
6.5	Distribución del índice de tiempo en la segunda sala de espera por repetición . . . . .	80
6.6	Distribución del índice de la tasa ocupación de las enfermeras por repetición . . . . .	80
6.7	Distribución del índice de tiempo de la tasa ocupación de los médicos por repetición . . . . .	81
6.8	Distribución del índice de la tasa de pacientes atendidos (de los que entran) por repetición . . . . .	81
6.9	Sensibilidad a cambios en parámetros del índice de tiempo de atención . . . . .	83
6.10	Sensibilidad a cambios en parámetros del índice de tiempo en la primera sala de espera . . . . .	85
6.11	Sensibilidad a cambios en parámetros del índice de tiempo en la segunda sala de espera . . . . .	86

6.12 Sensibilidad a cambios en parámetros del índice de la ocupación de las enfermeras	87
6.13 Sensibilidad a cambios en parámetros del índice de la ocupación de los médicos	88
6.14 Sensibilidad a cambios en parámetros del índice del porcentaje de pacientes atendidos . . . . .	89

# Índice de cuadros

4.1	Individuos identificados como ser representado por agentes activos y los lugares donde interactúan . . . . .	32
4.2	Variables de estado y sus valores . . . . .	38
4.3	Tabla con transiciones determinísticas . . . . .	44
4.4	Tabla con transiciones estocásticas . . . . .	45
4.5	Individuos identificados a ser representados por agentes pasivos . . . . .	47
4.6	Lugares y los agentes que interactúan de ellos . . . . .	58
5.1	Sección de tabla de estados de un paciente . . . . .	65
6.1	Extracciones de la tabla de transiciones para un paciente en una sala de espera .	72
6.2	Extracciones de la tabla de transiciones para un paciente en triaje . . . . .	73
6.3	Parámetros y los valores que pueden coger . . . . .	76



# Índice de ecuaciones

4.1 Pesos de transiciones probabilísticas . . . . .	45
5.1 Número de escenarios . . . . .	69
5.2 Tiempo para ejecutar un paso del simulador . . . . .	70
5.3 Tiempo para ejecutar una simulación . . . . .	70



# Capítulo 1

## Introducción

*“Ciudadanos sanos son el mejor recurso que cualquier país puede tener.”*

Winston Churchill

La salud es, sin lugar a dudas, uno de los aspectos más importantes para las civilizaciones modernas. La gestión de los sistemas de salud es una tarea importante en la que participa mucha gente, desde el gobierno y la industria hasta las mismas comunidades a las que presta servicios.

Garantizar un servicio de salud nacional representa un Gran Reto, según la siguiente definición[12]:

*Un problema fundamental de la ciencia y la ingeniería, que tiene un amplio impacto económico y científico, y a cuya solución se puede llegar a través de la aplicación de técnicas y recursos propios de la computación de altas prestaciones.*

En este contexto la salud, o mejor dicho la administración de servicios nacionales de salud, es un área que necesita el soporte de técnicas de computación que ayuden en la planificación de una buena distribución de recursos humanos y materiales. Hay muchas maneras de incluir computación en esta tarea, una de las cuales es el uso de la simulación como la base de un sistema de ayuda a la toma de decisiones.

Una de las áreas más complejas y más dinámicas en el ámbito de la salud es el servicio de urgencias. No todos los ingresos a hospitales son planificados, y cada día muchas personas necesitan los servicios de departamentos de urgencias, servicios de los hospitales que tratan pacientes que se presentan sin aviso con enfermedades y heridas de todo tipo.

En el año 2007 hubieron 26.265.100 casos de admisión en centros de urgencias en España, es decir más de un ingreso por cada dos habitantes[14]. Con esta cantidad de ingresos el nivel de gestión de los recursos es muy grande.

## 1.1. Ciencia computacional

La ciencia computacional se encuentra en el centro de tres importantes ámbitos como son la matemática, la ciencia, y la informática. Adicionalmente, provee un punto común entre la teoría y la tecnología. Como se muestra en la Figura 1.1, el problema de la simulación de un sistema de urgencias se encuentra en la intersección de estos tres ámbitos de la ciencia computacional.

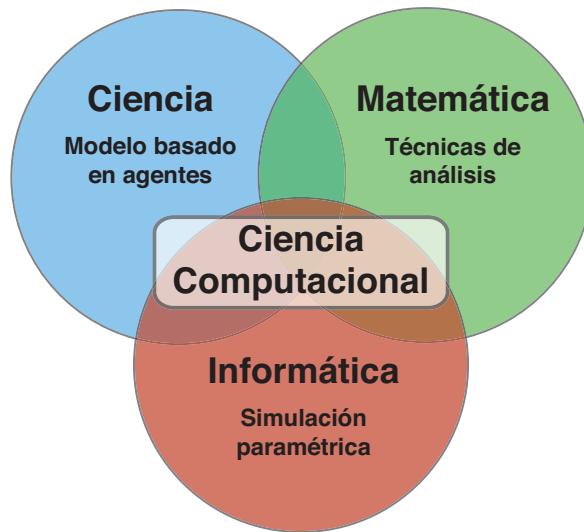


Figura 1.1: La ciencia computacional se sitúa en la intersección de la matemática, la ciencia, y la informática

El modelado basado en agentes es un elemento de la ciencia, por lo cual siguiendo este modelo es posible ganar una nueva perspectiva del sistema real, es decir el departamento de urgencias y su funcionamiento. Con la ayuda de la sociología, será posible modelar los pacientes y el personal de urgencias a un nivel que captura, no sólo su comportamiento, sino también las razones de su comportamiento y, especialmente, las reacciones de los pacientes frente a cambios en el servicio.

Un modelo tan complejo necesita grandes recursos computacionales para su ejecución, y es según estas técnicas informáticas que será posible ver el comportamiento del modelo bajo conjuntos de parámetros diferentes. También, permitirá visualizar las simulaciones para así poder compartir los resultados de la simulación con el personal de los departamentos de urgencias, a fin del que pueden ganar conocimiento nuevo del comportamiento de sus propios departamentos a través de esta investigación.

El análisis del simulador para la validación funcional será posible a través de las técnicas de análisis que provee la matemática. No sólo en el análisis de las simulaciones y la validez de sus resultados, sino también en la optimización del sistema que se representa mediante el modelo y su sintonización para el uso en otros departamentos de urgencias.

## 1.2. Problema

Los departamentos de urgencias son sistemas muy complejos, con muchas variables que presentan interdependencias entre ellas. Además, los departamentos tienen un comportamiento dinámico que depende del ingreso de pacientes, una variable compleja en sí misma que cambiar día a día, mes a mes, y año tras año. La selección de políticas dotación de recursos humanos es una tarea que resulta complicada incluso para profesionales con experiencia en el departamento que administran.

Con presupuestos que no aumentan con la misma rapidez con que aumenta la demanda para el uso de este recurso tan importante, más y más administradores de departamentos de urgencias buscan nuevas técnicas para mejorar la eficiencia de los servicios de urgencias.

En un ámbito donde se trata con vidas humanas cada día, esta búsqueda de mejoras enfrenta con problema en cuanto se propone un cambio del proceso. Si un cambio tiene efectos no previstos o deja huecos en el tratamiento de pacientes, dicho cambio puede poner en peligro la salud o incluso la vida de pacientes de urgencias.

La simulación provee un método más seguro y eficiente para probar nuevas técnicas y procesos a fin de mejorar la eficiencia de departamentos de urgencias. Un modelo suficientemente completo puede ser usado para probar y asegurar los cambios del sistema real sin poner en peligro personas reales. Adicionalmente una simulación puede ser usada para probar una cantidad de escenarios posibles demasiado grande como para estudiar en un departamento de urgencias real, y además se puede hacer en una cantidad de tiempo mucho menor.

El uso de estas técnicas de simulación lleva a otras posibilidades. Las ventajas del uso de la simulación permite la búsqueda automática de escenarios que provean las mejores soluciones para un conjunto de restricciones y estados futuros. Esta automatización de la búsqueda de mejoras a un servicio de urgencias puede ayudar mucho a los administradores que tienen tanta necesidad de soluciones a problemas que pueden parecer imposibles.

En resumen, lo único que se necesita es un modelo suficientemente completo de un departamento, a partir del cual sea posible comparar escenarios potenciales. Desafortunadamente, es una tarea de cierta escala construir un modelo que puede cubrir todas las necesidades de un departamento de urgencias, incluso uno pequeño.

Un modelo, y un simulador que se base en él, necesita del trabajo conjunto de un equipo multidisciplinario, que incluye personas con conocimiento del sistema, el departamento, personas que puedan construir el modelo y el simulador hasta un nivel que servirá como la base de un sistema de ayuda a la toma de decisiones.

Existen ya varias herramientas que cumplen algunas de estas especificaciones, pero surge otro problema, la generabilidad. Un modelo hecho para una tarea en un hospital no suele ser adaptable a otros problemas y otros departamentos de otros hospitales. Existe la necesidad de

una herramienta, que no sólo sería adaptable en el uso, que puede ser usada para varias tareas, pero que también sería adaptable a entorno, que se pueda cambiar la configuración según el departamento de urgencias que se quiera estudiar, y que preferiblemente no necesite grandes cantidades de trabajo manual para ajustarlo al nuevo ambiente.

## **1.3. Objetivo**

El objetivo de esta investigación se puede dividir en dos partes. La primera es el objetivo de corto plazo, que incluye el trabajo que se presenta en este trabajo, pero también es importante ver a donde va el trabajo en el futuro, para que pueda ser situada dentro del trabajo final y tener una especie de medida de la contribución de dicho trabajo a la solución final.

### **1.3.1. Corto plazo**

En el corto plazo, el objetivo de este trabajo se tratar de la implementación de un simulador valido de un departamento de urgencias. Ese simulador se basará en un modelo desarrollado a través de información recibida del personal de un departamento de urgencias y validada funcionalmente con las definiciones proveídas.

El simulador debe ser a la vez usable a través de una interfaz gráfica para los usuarios no técnicos que puedan ver el comportamiento del departamento simulado. También requerirá la característica de lanzar simulaciones paramétricas porque algunos usos del simulador necesitarán los resultados de miles de ejecuciones del simulador.

Una fase de validación será necesaria después de que el simulador haya acabado. La primera fase del desarrollo acabará con una validación funcional del simulador, para mostrar que los resultados de las simulaciones cumplen con las funciones tal y como fueron descritas por el personal del departamento de urgencias.

### **1.3.2. Largo plazo**

El simulador es sólo el primer paso en la búsqueda de una solución al problema planteado en la sección anterior. Para proveer una herramienta de uso general, hay dos líneas para seguir en paralelo si es posible.

- La sintonización automática del simulador para el uso en hospitales diferentes;
- La búsqueda inteligente de configuraciones óptimas o semi-óptimas de parámetros bajo condiciones específicas

La sintonización del simulador será lo que permita usarlo como una herramienta en varios sitios sin necesidad de empezar con un nuevo análisis y un nuevo modelo. Usando datos del departamento objetivo el sintonizador será capaz de ajustar unas variables internas para acercar el simulador a la realidad.

El espacio de parámetros del modelo presentado ha llegado a ser bastante grande, y está previsto que el número de parámetros aumentará mientras el simulador se acerca más a la realidad. Con una cantidad de combinaciones tan grande se necesitará una función de búsqueda de configuraciones óptimas según unos criterios especificados por el usuario. Dicha búsqueda tendrá que ser más inteligente que buscar por todo el espacio de parámetros por el gran tamaño de este espacio.

## 1.4. Metodología de desarrollo

El trabajo descrito en este documento es parte de un proyecto que durará un tiempo más largo que la investigación hecha hasta ahora. Por eso es importante que se contextualice dentro del trabajo.

La metodología que se usa en este trabajo sigue el modelo de la espiral. Este modelo de desarrollo se basa en iteraciones de trabajo, donde cada vuelta de la espiral da como resultado un simulador válido. El modelo específico que se utiliza tiene cinco fases las que se muestra en la Figura 1.2.

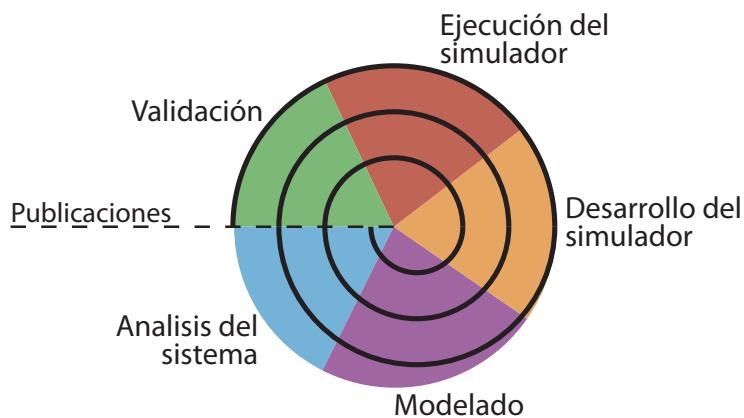


Figura 1.2: Cinco fases del modelo de desarrollo usado

La primera fase es la de análisis del sistema. A través de unas entrevistas con el personal clave de algunos departamentos de urgencias, se colectan detalles del funcionamiento general de departamentos de urgencias. Es la información de esta fase la que se usará para la validación del simulador.

La segunda fase es la de modelado. Usando la información que se ha agregado durante la

fase de análisis, se modela el departamento de urgencias. Este modelo se compara constantemente con los detalles especificados en la fase de análisis para verificar que el modelo descrito cumple con las especificaciones.

La tercera fase es la del desarrollo del simulador. Con la especificación formal del modelo que se ha desarrollado, se elige una plataforma de simulación y se implementa un simulador que se puede ejecutar. Esta fase refiere constantemente a la fase anterior en la que se describe el modelo.

La cuarta fase es la de la ejecución del simulador. Se usan parámetros del sistema real para configurar el simulador y después ejecutarlo. Esta fase obviamente usa el simulador que se ha desarrollado en el fase anterior, y computa los resultados de unas escenarios predefinidos en la fase de análisis del sistema.

La quinta y última fase es la de la validación en la que los resultados de la fase anterior se comparan con datos del sistema real. En esta fase es muy importante que los datos sean diferentes a los que se han usado para el desarrollo del modelo y el simulador. Es esta última fase en la que se muestra exactamente hasta donde el simulador se acerca a la realidad.

Después de la primera iteración, los datos se usarán para empezar la siguiente fase del análisis del sistema. Con los parámetros iniciales, o los nuevos añadidos en la última vuelta de la espiral, reducen las posibles fuentes de errores en el simulador. Usando esta metodología, es posible controlar el estado del simulador de una manera que no sería posible si el simulador hubiese implementado todos los posibles parámetros identificados desde el principio.

Las publicaciones al final de cada iteración del espiral tienen una parte importante en la metodología. Con el sistema de evaluación por partes, se puede ver al final de cada iteración del simulador que la investigación se añade conocimiento a la literatura. De esta manera, no sólo se valida comportamiento del simulador a un nivel técnico contra el sistema real, sino también se realiza una validación de la metodología misma y los nuevos conceptos se validan por la comunidad científica.

## 1.5. Organización de la memoria

En este capítulo se ha presentado el entorno de investigación, la aplicación de la ciencia computacional a problemas de la gestión de servicios de salud. El problema que existe en este área y el objetivo de este trabajo también se ha delineado, con la metodología que se usa.

El capítulo 2 presenta un introducción a los modelos basados en agentes cuyas ventajas y desventajas se explica en el contexto del modelado de interacciones entre personas en la sociología.

El capítulo 3 está dedicado a explicar el uso de la simulación en el entorno de la gestión de servicios de salud. Se describe unos de los retos de dicho entorno de simulación y se discute

algunas investigaciones relacionadas con el trabajo presentado.

El modelo desarrollado se expone en el capítulo 4. Se presentan los componentes del modelo incluyendo los agentes activos y pasivos, el entorno donde actúan y la manera de se han modelado los agentes y la comunicación entre ellos.

El capítulo 5 presenta el simulador que se ha implementado basado en el modelo desarrollado. Se describe las técnicas y herramientas que se han usado para crear el simulador cuyas propiedades también se exploran.

La validación del simulador y el análisis del modelo se explican en el capítulo 6. El simulador se ha validado contra el modelo desarrollado y también se presenta el análisis de las propiedades importantes del modelo a través de ejecuciones del simulador.

Para finalizar, el capítulo 7 se dedica a resumir el trabajo realizado con algunos aspectos del análisis del modelo y su implicaciones en el campo de la gestión de departamentos de urgencias. Adicionalmente se plantean algunas líneas abiertas de la investigación presentada.



## **Capítulo 2**

# **Modelos Basados en Agentes de la Interacción Sociológica**

Este capítulo está dedicado a explicar la técnica de modelado basado en agentes y su aplicación en el ámbito de la interacción entre seres humanos en un contexto sociológico.

### **2.1. Modelos Basados en Agentes**

Esta sección se dedica a explicar los modelos basados en agentes, definiendo en qué consiste un modelo de estas características y cuales son sus usos, ventajas y desventajas.

Dentro de la literatura uno puede encontrar que dichos modelos responden a denominaciones diversas, modelos basados en u orientados a individuos o agentes. En muchos casos estos nombres se diferencian de acuerdo al campo dentro del cual son utilizados.

#### **2.1.1. Definición**

Se puede considerar que un modelo está basado en agentes si cumple una regla simple, toda la información en la que consiste el modelo está una descripción del comportamiento de los agentes. Es decir, no hay ninguna descripción a más alto nivel que la definición de cómo se comportan los agentes que forman el modelo.

Un modelo basado en agentes se compone de tres elementos.

- Los agentes, con sus reglas de comportamiento
- El entorno
- Las reglas de interacción entre agentes

Un modelo basado en agentes tiene dos componentes básicos; los agentes y el entorno donde residen todo bajo una serie de reglas que describen la interacción entre esos componentes básicos. Por un lado, los agentes representan los elementos activos del modelo, que en muchos casos son representaciones de organismos como personas o animales aunque no hay ninguna razón por ser explícitamente así.

Por otro lado, el entorno es una representación abstracta de un espacio real donde un grupo de individuos pueden interactuar. El nivel de granularidad del entorno depende completamente del modelo y podría ser una representación multidimensional cartesiana o un simple grafo interconectado.

Epstein identificó unas características de modelos basados en agentes que se son idóneas para su uso en ciencia generativa[7]. A través de las cuales interacciones descentralizados y locales generan un comportamiento global que no está especificado explícitamente.

### **Heterogeneidad**

Cada agente se representa individualmente, no se agrupan agentes a un único tipo que intenta ser representativo de toda la población. Los matices de la diversidad de la población modelada se incluye en el modelo con agentes heterogéneos que cubren las distinciones que existen en el sistema real.

### **Autonomía**

Los agentes son independientes y pueden actuar solos sin ningún forma de control global que centralice el modelo. Cada agente toma decisiones según sus propios criterios, basado en la información que tiene en un momento de tiempo y las experiencias que ha tenido hasta dicho momento de tiempo. Las reglas sólo se definen a bajo nivel y nunca se especifican a un nivel global.

### **Espacio explícito**

La localidad de los agentes dentro de su entorno de existencia está definido y tal entorno también tiene una definición basado en las limitaciones del sistema real. Es desde este espacio explícito que viene la especificación del concepto “local”.

### **Interacciones locales**

Las interacciones entre agentes están limitadas de acuerdo a su ubicación. Junto con el punto anterior esta limitación de localidad lleva la importante restricción de que no todos los agentes son igualmente accesibles desde el punto de vista de un agente específico.

## Racionalidad limitado

Los agentes están limitados en dos puntos específicos que tienen analogías en muchas sistemas reales. Primero, tienen un conocimiento limitado, ya que no saben toda la información que existe del sistema, y necesitan tomar decisiones basados en la información limitada que tienen en el momento de tomar la decisión. Segundo, no tienen recursos computacionales ilimitados, es decir los agentes tienen que tomar decisiones dentro de un periodo de tiempo razonable, y no pueden estar calculando posibles soluciones de problemas indefinidamente. Estos dos puntos restringen los agentes a ser más “mortales”, representando individuos que toman decisiones en un tiempo limitado con información también limitada.

### 2.1.2. Representación de agentes

Un agente puede representar cualquier tipo de componente individual de un sistema real[3], desde elementos tan simples que su comportamiento se puede representar con un par de reglas (“prisoner dilemma” o “metanorms”) hasta representaciones de individuos que actúan con procesos de toma de decisiones de alto nivel, como un ser humano por ejemplo (buscar un ejemplo de agentes muy complejos).

En un modelo basado en agentes, cada agente es realmente un submodelo y la representación de estos puede coger casi cualquier forma, desde los métodos normales de modelado como máquinas de estados, modelos analíticos, y algoritmos de comportamiento hasta métodos traídos de otros ámbitos como arquitectura “subsumption” - una técnica que nació en el ámbito de la robótica[5].

Los agentes también se puede representar mediante otro modelo basado en agentes (por definición más pequeño que el nivel de arriba) que a su vez puede estar representado por un modelo basado en agentes, aunque en un momento los agentes de un nivel se tendrán que modelar usando otra técnica o se acabaría con un modelo de profundidad infinita.

### 2.1.3. Representación del entorno

Dentro de un modelo basado en agentes, el entorno es el elemento que agrupa a todos los agentes. El entorno es importante porque es el lugar donde los agentes actúan y las interacciones entre ellos ocurren; sin el concepto de espacio, los agentes estarán perdidos.

Aunque el entorno tiene un rol clave en el modelo, este no es un elemento activo, es tan sólo un contenedor para los elementos que describen el modelo y mientras tiene una influencia en como comporten los agentes, un entorno vacío no tiene ninguna importancia.

## **2.2. Comparación con otras técnicas de modelado**

### **2.2.1. Ventajas de modelos basados en agentes**

Los delos basados en agentes tienen su fortaleza en ámbitos donde es importante explicar un fenómeno. Usando un modelo basado en agentes es más fácil ver de donde viene el comportamiento de todo un sistema y explicar porque funciona así.

En un sistema que está naturalmente divido en individuos, un modelo basado en agentes es la técnica más útil para crear un modelo que realmente explique el sistema sin la necesidad de ponerlo demasiado en abstracto. Puede representar partes del sistema que son realmente independientes, y no una agregación de estas partes que intenta usar valores medias para todos.

Un área donde los modelos basados en agentes tiene una ventaja clara es en la representación de la ubicación. Al contrario de modelos de colas o sistemas de ecuaciones diferenciales, pueden representar la ubicación de cada individuo dentro de un sistema, y más importante, usar esta información para guiar el comportamiento de los agentes. Un modelo, sobre el contagio de una enfermedad dentro de una ciudad por ejemplo, depende mucho de la separación de los habitantes y de como se mueven por el entorno - un problema muy difícil de modelar sin la libertad de posicionamiento que brinda un modelo basado en agentes.

Desde el punto de vista de la explicación de un modelo, como dijo Epstein, "Si no lo hiciste crecer, no lo has explicado" [7]. Por el contrario, mientras un modelo matemático, o una serie de ecuaciones diferenciales describen un sistema, no siempre lo explican.

### **2.2.2. Desventajas de modelos basados en agentes**

El modelado basado en agentes es un proceso complejo, por lo tanto el modelador debe tener una idea suficientemente completa del sistema en general como de cada agente para construir un modelo de individuos que crean un comportamiento emergente que describe la realidad. Mientras un modelo analítico puede representar la realidad de una manera bastante abstracta debido a que funciona como una caja negra donde sólo las entradas y salidas del sistema son importantes, un modelo basado en agentes pierde mucha de su utilidad si no se acerca a la realidad suficientemente.

La segunda desventaja de un modelo basado en agentes es que, como no es una representación matemática, la única manera de verificarlo y usarlo es construyendo y ejecutando una simulación basada en este modelo. La complejidad y frecuente gran tamaño de modelos basados en agentes también significa que necesitan una gran cantidad de recursos computacionales para ejecutar un modelo de sólo modestas proporciones [28].

Hoy en día, las tecnologías computacionales han avanzado a un punto que permiten utilizar modelos basados en agentes de gran escala, pero sólo con la ayuda de computadores de altas prestaciones[26].

## 2.3. Ámbitos de uso

El uso de agentes no es apropiado para modelar todo tipo de sistemas, tampoco hay reglas que determinen estrictamente que unos sistemas se puedan modelar con agentes y otros no, pero en su lugar hay condiciones que hacen que un sistema sea más o menos apropiado de representar con un modelo basado en agentes.

Sistemas que tienen divisiones naturales a individuos son ideales para modelar con agentes, pero también sistemas que no son obviamente divisible puede ganar del uso de un modelo basado en agentes. Sistemas que se constituyen de personas, animales, u otros organismos heterogéneos tiene una analogía natural en un modelo de agentes, pero también sistemas de individuos homogéneos que se mueven por un entorno libre o menos constrictivo se pueden traducir a un modelo basado en agentes con menos pérdida de realidad que a otros tipos de modelos.

Por todas estas razones los modelos basados en agentes se usan en muchos campos de estudio; en economía es usado para modelar sistemas que abarcan desde *free trading*[1] a modelos de gestión de cadenas de suministro[19]. Biología es un campo donde se ha encontrado muchos usos de modelos basados en agentes, específicamente modelando propiedades emergentes de grupos de animales que parecen funcionar juntos como los bancos de peces[13][26] o en ámbitos de transmisión de enfermedades entre personas o animales[6]. Campos menos tradicionales también son candidatos perfectos para ese tipo de modelado, como por ejemplo el de ciencias de sostenibilidad[22].

En sociología hay un gran potencial para el uso de modelos basados en agentes. La división natural de poblaciones en individuos heterogéneos (es decir seres humanos) representa la situación perfecta para el uso de modelos que estudian las cualidades emergentes de sistemas[7].

### 2.3.1. Modelos basados en agentes en sociología

Esta sección se dedica a explicar el uso de modelos basados en agentes en el ámbito de la sociología, especialmente en relación al modelado de interacciones entre personas.

En el área de las ciencias naturales, el modelado y la simulación se han aceptado generalmente como una metodología; en cambio, en el ámbito de las ciencias sociales su aceptación ha sido relativamente más reciente. Una razón de esto puede ser que el valor principal de la simulación en las ciencias sociales es el desarrollo de teorías, y no la predicción como tal[11].

## Analogías entre personas y agentes

La sociología presenta la analogía perfecta para los agentes de modelos basados en ellos, en seres humanos. El estudio del comportamiento de personas encaja bien con las propiedades de modelos basados en agentes como se ha descrito en la Sección 2.1.

Por naturaleza las personas son heterogéneas, cada persona es única y aunque es posible agrupar sus diferencias a un grupo reducido de tipos, hay situaciones en las que un tipo promedio que representa a todos los individuos de una población no es lo suficientemente detallado.

Adicionalmente, las personas son autónomas y actúan de manera individual. Aún en casos en los que es posible reducir las diferencias de personas a un pequeño número de tipos; después de un primer momento, las acciones de los individuos van cambiando mientras estos reaccionan en base a la experiencia de corto plazo y las relaciones entre sí dejan rápidamente el estado inicial.

El hecho de que todas las personas vivan en un mundo de espacio explícito restringe sus acciones, cambia su comportamiento respecto a cómo interactúan unas con otras, y a los lugares por los que se desplazan. Este espacio explícito es la razón por la cual la cultura está dividida y personas de países diferentes tienen normas diferentes.

Durante interacciones locales, las personas tienen más probabilidad de comunicarse e interactuar con otras que estén geográficamente cercanas que con el resto. Aún en un mundo en el que la tecnología permite a la gente comunicarse a grandes distancias, se puede observar el mismo tipo de aislamiento cultural que muestra la fortaleza de interacciones locales.

Las personas tienen racionalidad limitada, por lo que ninguna de ellas sabe todo lo que hay que saber ni tampoco puede calcular todas las posibilidades existentes antes de cada acción. Aunque una persona cuente con mayor conocimiento que otras en ciertas situaciones, todas están restringidas a actuar en base al conocimiento que poseen en cada momento.

## Normas sociales

Los modelos basados en agentes se especializan en modelar aquellos conceptos que surgen de un conjunto de individuos, pero que no existen visiblemente en ningún individuo específico. Las normas de la sociedad son un ejemplo sociológico que tiene la propiedad de emergir de un grupo.

Mediante la construcción de normas dentro de una sociedad y junto a otras que por encima refuerzan a las primeras (Axelrod las denomina "metanomas"[2]) se puede ver la evolución usando un modelo basado en agentes. Un modelo más reciente muestra que tales normas reducen la necesidad de pensar de cada individuo - e incluso funcionan mejor en la ausencia

de pensamiento[8]. Tal comportamiento explica la razón por la cual se puede modelar, mediante reglas simples, un agente que representa a una persona. Las personas, dentro de ciertos ámbitos, siguen reglas de comportamiento, las normas, sin la necesidad de calcular cada paso momento a momento.

### **Enlazamiento de campos distintos**

Tradicionalmente, y por razones de separación de disciplinas de investigación, los modelos se han dividido en las fronteras de esas disciplinas. Para crear un modelo que cruza dichas fronteras se ha unido más de un paradigma de modelado. Estos modelos han sido criticados argumentando que cada modelo hace supuestos que no necesariamente encajan con los demás.

El uso de un modelado basado en agentes puede ser de gran ayuda en áreas donde existen múltiples campos distintos a ser estudiados. Debido a las reglas simples que emplean los modelos de agentes, hay menos supuestos ocultos que podrían causar problemas en el futuro. Si un agente es modelado con reglas multidimensionales, es decir que posee aspectos de economía social, adaptación cultural, y demografía - aunque se trate de reglas básicas - el comportamiento global del modelo, la sociedad artificial que emerge también sería multidimensional[7].

## **2.4. Como construir un modelo basado en agentes**

Los modelos basados en agentes tienen algunas diferencias en cuanto empieza el proceso de modelado. Por razones del enfoque en las partes, el comportamiento de los individuos parece más importante que el comportamiento global en la fase de modelado.

En esta sección se exploran los pasos que uno debe seguir para construir un modelo basado en agentes.

### **2.4.1. El objetivo**

La importancia de tener un objetivo no se limita a modelos basados en agentes, pero es tan importante que merece la pena ser mencionado. Un modelo necesita un objetivo, sin este concepto no hay manera de tomar las decisiones relevantes al momento de elegir que se debe modelar y que no. Un objetivo claro de por qué se va a usar un modelo permite al modelador incluir sólo los elementos que formen un modelo de complejidad mínima[33] del sistema.

## **2.4.2. Los agentes**

Los agentes, como sugiere el nombre, son los elementos claves en un modelo basado en agentes. La buena elección del nivel correcto a modelar es una parte importante que dará como resultado un modelo con mucho más sentido.

### **Identificar los agentes**

El sistema modelado tendrá numerosos componentes, lo cual no implica que cada componente se deba modelar como agente. El primer paso del análisis es identificar los individuos que se van a representar mediante agentes. La representación de un individuo por medio de un agente tiene que estar justificada, porque durante las fases de modelado y de análisis del modelo con respecto al sistema real, más individuos significarán el desarrollo de un modelo más complicado y más difícil de verificar.

### **Definir comportamiento relevante**

Los individuos que se representan en un modelo basado en agentes suelen ser muy complejos, principalmente en el ámbito de la sociología. Por lo tanto, modelar una persona entera es un trabajo que raramente está dentro del alcance de un proyecto de modelado de estas características.

Por tanto, se deben definir los comportamientos que sean más relevantes para el modelo. De este modo, cada individuo del sistema cumple un rol; y lo que se tiene que modelar es el rol y no el individuo. Una vez definido este comportamiento, se puede empezar a modelar.

### **Modelar agentes**

Como se explica en la sección 2.1.2, un modelo basado en agentes es un modelo de modelos (valga la redundancia). Cada agente se representa por un modelo, y como en cualquier otro tipo de modelado, hay que elegir el modelo que representará a los individuos. Hay un número de aspectos que se pueden usar para elegir la técnica de modelado, como el tipo de movimiento que hace el agente y los estados en los que estará durante un periodo de tiempo modelado.

## **2.4.3. El entorno**

El segundo aspecto de un modelo basado en agentes es la ubicación de estos; en otras palabras, el entorno. Al contrario de otras técnicas de modelado, un modelo de agentes casi siempre modela el aspecto de ubicación; la manera exacta en que este se modela depende del sistema y de los objetivos del modelo.

## **Identificar el entorno**

Es importante identificar el entorno del sistema, aunque puede ser muy obvio, no siempre es el caso. Los límites del entorno son casi tan importantes como el entorno en sí mismo. Se puede tomar, por ejemplo, un modelo de un banco de peces; si la frontera del entorno representa un obstáculo entonces es posible que los peces necesiten otras reglas para saber como comportarse cuando se encuentren con algo así, reglas que no serían necesarias sin el concepto de un entorno con límites.

## **Definir el nivel de descripción**

Al igual que la definición del comportamiento relevante de un agente, es necesario definir a que nivel hace falta describir el entorno. Muchos modelos definen el entorno como un espacio cartesiano en dos o tres dimensiones. Los agentes se mueven por el espacio según sus propias reglas, pero no siempre será necesario un entorno de alta granularidad.

En casos donde la situación con respecto a otros agentes es más abstracta, un entorno que consista en una serie de lugares interconectados será suficiente, debido a que los agentes sólo necesitan saber si otros agentes tienen la misma ubicación.

### **2.4.4. Las interacciones**

La parte de un modelo basado en agentes que actúa como el pegamento que une todo el modelo son las interacciones de los agentes entre sí y con el entorno. Es gracias a estas interacciones que el modelo es más que un conjunto de pequeños submodelos.

#### **Quién con quién**

La primera cosa a definir es la manera de interactuar de los agentes, quién lo hace con quién. Un sistema homogéneo tendrá interacciones iguales entre todos los agentes, pero lo más normal es un sistema heterogéneo donde las interacciones se basan en los tipos de agentes, sus estados y ubicaciones respectivas.

#### **Tipos de información comunicada**

El propósito de una interacción es la transferencia de información, y en muchos casos es esta transferencia la que se quiere modelar. Por lo tanto, es importante definir que tipo de información van a comunicar los agentes. Un ejemplo puede ser la información sobre el estado del agente, o en modelos como la propagación de enfermedades puede ser el estado en sí mismo que se transfiere entre agentes.

## **Efectos de la interacción**

Para modelar correctamente las interacciones entre agentes y la información que se comunica, es importante definir cuales son los efectos de dichas interacciones. Si estas interacciones cambian el estado de un agente y sólo sirven para modelar la transferencia de información son dos casos distintos, y según el objetivo del modelo podrían afectar la manera en la que se modelan las interacciones.

# **Capítulo 3**

## **La simulación en el ámbito de salud**

Este capítulo está dedicado a explicar el estado del arte del modelado y simulación de departamentos de urgencias. Se discuten las técnicas usadas dentro del campo y cómo se relacionan con el modelo presentado.

### **3.1. Simulación de sistemas de gestión en el ámbito de salud**

La aplicación de simulación en el ámbito de la gestión de salud se ha usado durante más que 30 años[10]. Aún así el nivel de uso y los resultados en este ámbito son menos de lo esperado. En otros campos similares a un nivel de complejidad se aventajan mucho más las tecnologías de modelado y simulación.

En esta sección se describe el uso de simulación en el ámbito de la salud, los tipos de simulaciones existentes y distintos desafíos que surgen al desarrollar simulaciones en este campo.

#### **3.1.1. Retos de la simulación en salud**

Como muchas áreas de simulación hay un número de retos que se enfrentan en este tipo de simulación de gestión en el ámbito de salud. Los retos que existen se puede dividir en dos grupos, los retos técnicos y los que tienen que ver con el factor humano, el modelador o el cliente.

##### **Retos técnicos**

Los problemas que son técnicos tienen dos aspectos importantes. El primero es la habilidad de crear simulaciones que sean válidas - que la simulación realmente implemente el modelo en que se base - y verificadas - que la simulación logra un comportamiento que represente el

sistema real en la que está modelando. Como parte de una reseña del uso de simulación en el ámbito de salud Fone et al. menciona que no es posible llegar a ninguna conclusión del valor de esas simulaciones porque la evidencia de implementación es muy escasa[10].

Una de las razones por aquella falta de evidencia puede ser la dificultad de agregar los datos necesarios para la verificación de las simulaciones[27]. La dificultad en encontrar datos de los sistemas que se modelan surge de dos aspectos. Uno es la privacidad inherente en la mayoría de los datos de sistemas de salud, en muchos casos puede ser difícil conseguir acceso a datos, aún de manera anónima. El otro es que en muchos casos los datos que necesita un modelador para verificar su modelo simplemente no existen, no todos los procesos son informátizados y en otros casos los datos no se guardan este tipo de utilización.

El último problema técnico también se relaciona con la implementación, pero más con la generalidad de los modelos que se crean[4]. Hay un gran número de clientes potenciales, como hospitales, clínicas, etc. de los cuales cada uno de ellos tiene sus propias prioridades y necesidades de un simulador. Es muy fácil obtener una simulación que cumple muy bien el objetivo de un hospital, pero que no tiene utilidad para los demás, aunque son parte del mismo grupo de administración. Esta falta de generalidad provoca muchas simulaciones similares pero incompatibles, y mucha repetición de trabajo en las fases de análisis y modelado.

## **Retos humanos**

Hay un sentimiento dentro de la literatura de los retos técnicos son muy pocos enfrente de los retos en la recepción de simulaciones dentro del ámbito de salud. Es el aspecto humano que presenta los retos más difíciles de superar[4].

La aceptación del uso de simulación para explorar y resolver problemas no es algo fácil de encontrar. Para crear un modelo con éxito se necesita el soporte del personal del ámbito de la salud de todos sus niveles, desde los ejecutivos hasta las enfermeras que trabajan día a día.

La simulación en ocasiones puede presentarse como un proceso muy complejo para las personas. Es a partir de la buena explicación de su uso y sus beneficios, lo que llevaría la aceptación de la simulación como una herramienta[21]. En un ámbito donde tradicionalmente se han usado métodos determinísticos el cambio a un sistema que a primer vista parece aún más complicado se van a presentar problemas sin duda.

El último reto puede ser uno de los más difícil de sugerir, en un ámbito que tiene tanta énfasis en el factor humano del trabajo día a día, o sea los pacientes, simulación parece una deshumanización de aquellos pacientes tan importantes. En cuanto los pacientes se reduce a un nivel de números o elementos en una cola la administración de un hospital se verá un paso detrás de todo lo que intentan hacer.

### 3.1.2. Taxonomía de modelos en salud

Una taxonomía general de modelos en el ámbito de la salud fue propuesto por Brailsford[4], en la cual divide a los modelos en tres grupos, nombrados niveles 1, 2, y 3.

#### Nivel 1 - modelos biológicos

Modelos biológicos, también conocidos como “modelos de diseases” son modelos del cuerpo humano, muchas veces a un nivel de órgano o microbiológico. Están usados para ver las posibles reacciones que el cuerpo o parte de él puede tener bajo ciertas condiciones o con un tratamiento específico. Estos modelos se usan para verificar la eficiencia de un tratamiento o el efecto que tendrá una intervención en el avance de una enfermedad, algunos ejemplos de las consideraciones de modelos del nivel 1 se presentan en la Figura 3.1.

Modelos así se concentran en cuestiones médicas y, aunque se usan para tomar decisiones económicas, están basados en datos o conocimientos biológicos.

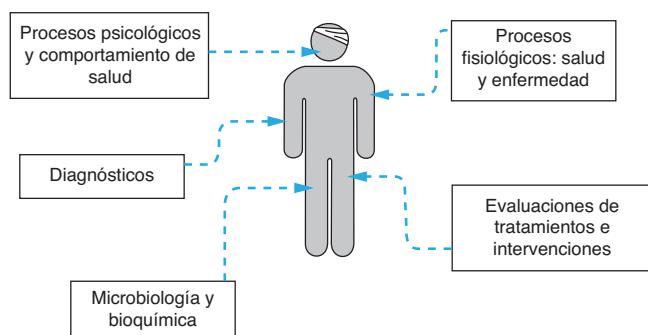


Figura 3.1: Consideraciones de modelos del nivel 1

#### Nivel 2 - modelos operacionales

Los modelos operacionales se centran en unidades médicas como el comportamiento de una clínica o un departamento de urgencias. Normalmente estos modelos modelan los individuos involucrados en el sistema, aunque esta representación sea básica o incluso homogénea. Algunos de las consideraciones de estos modelos se presentan en la Figura 3.2.

Un modelo del tipo nivel 2 se usa para responder a preguntas de gestión de servicios más que cuestiones biológicas. Preguntas como cual es el efecto en el tiempo de espera medio si el número de pacientes aumenta un 10 % con respecto al año previo o cuál estrategia de procesamiento de pacientes será más eficiente.

La simulación de departamentos de urgencias está situado en este nivel de modelado.

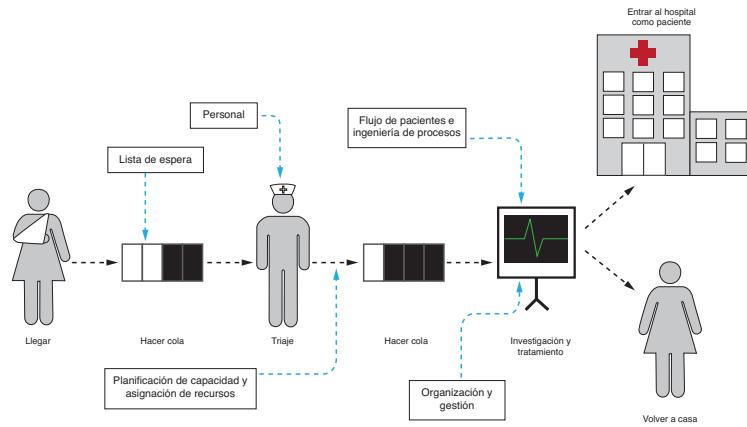


Figura 3.2: Consideraciones de modelos del nivel 2

### Nivel 3 - modelos estratégicos

Los modelos estratégicos representan sistemas más grandes, desde un hospital hasta los que intentan modelar todo el sistema de salud de un país. Por la escala de los sistemas que representan, estos modelos no son tan detallados como para individualizar las personas del sistema, sino que es común el uso de técnicas que llevan la complejidad del sistema a un nivel de reservas de recursos y flujos de los mismo. Se muestra algunas de las posibles influencias en este tipo de modelo en la Figura 3.3.

Los modelos de estos sistemas resuelven preguntas a más largo plazo que las otras niveles, teniendo la capacidad de realizar métricas anuales. El tipo de información que investigadores pueden obtener de estos modelos puede responder a preguntas como si un país tendrá una cantidad suficiente de enfermeras dentro de diez años o qué impacto tendrá la disminución de presupuesto de salud en ciertas ciudades.

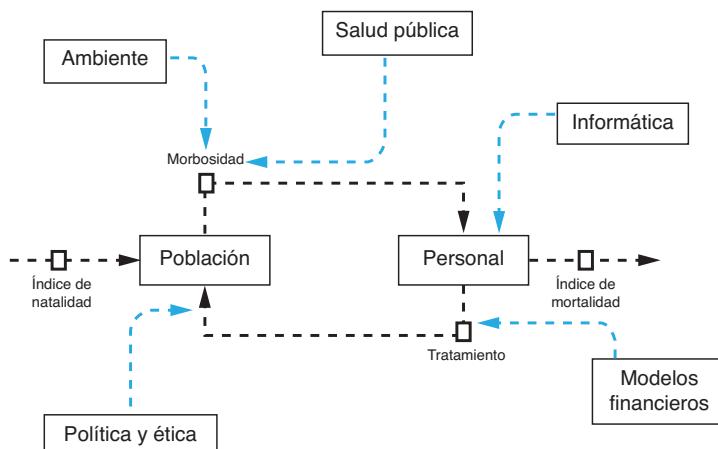


Figura 3.3: Consideraciones de modelos del nivel 3

## **3.2. Simulación de departamentos de urgencias**

Los departamentos de urgencias pueden ser unas de las áreas más fluidas y cambiantes del ámbito de salud. Es un sistema cuyas entradas, los pacientes, pueden llegar de cualquier manera que, aunque es posible predecir las probabilidades estadísticamente, hay un nivel muy alto de incertidumbre.

Estos departamentos también sufren, no sólo un patrón de llegada de pacientes difícil de prever, sino también que los pacientes son heterogéneos en todos sus aspectos, desde sus respectivas edades hasta el tipo de dolencia o problema con el cual se presentan. Una subida inesperada de muchos pacientes puede afectar todo el comportamiento de un departamento de urgencias de manera difícil de prever.

Cualquier sistema que trate con vidas de seres humanos necesita consideraciones especiales cuando existen cambios, y departamentos de urgencias no son ninguna excepción a esta regla. La configuración y la eficiencia de un departamento de urgencias tendrán un gran influencia en la habilidad de este departamento para tratar los pacientes que se presentan ahí.

Esta conexión entre el comportamiento de un departamento y el bienestar de los pacientes que son atendidos resulta ser un arma de doble filo. Por un lado es muy importante calificar la eficiencia de un departamento para sacar el rendimiento más alto posible en términos de atención a los pacientes cantidad de pacientes vistos y calidad de servicio proveído. Por otro, lado un cambio puede tener efectos imprevisibles que pueden poner en peligro el bienestar o las vidas de los pacientes.

La simulación provee un método para observar los posibles efectos que pueden producir ciertos cambios en el ritmo de llegada de pacientes, preparar el departamento para esta posible eventualidad y también para probar nuevas estrategias de planificación del departamento sin poner en peligro personas reales.

### **3.2.1. Usos de simulación**

La simulaciones de departamentos de urgencias se usan para cumplir varios objetivos, donde el objetivo final determina los requerimientos de la simulación y la manera en que el departamento es modelado.

#### **Predicción numérica**

Un uso de la simulación de departamentos de urgencias es la predicción del estado futuro estado del departamento basado en su estado actual. Esta forma de predicción numérica es muy parecida al tipo de predicción utilizada en meteorología para sacar donde se predice el tiempo unas cuantas horas en el futuro.

Un ejemplo concreto que se describirá en más profundidad en la Sección 3.3 es *ForcastED*[16]. Es un modelo que tiene como objetivo la predicción de métricas que describen el estado del departamento de urgencias entre dos y ocho horas en el futuro.

La predicción numérica es un caso de simulación que necesita una gran cantidad de datos muy detallados y exactos. Además, una simulación que se usa para una predicción numérica tiene que estar bien verificada y sintonizada al ambiente de uso, porque tiene que tener en consideración todas las variables que pueden afectar a las métricas que se quieren predecir.

### Comparación de escenarios

Los departamentos de urgencias son sistemas complejos con muchas variables y un nivel alto de incertidumbre en las externalidades - las variables que son externas del departamento y que están fuera de su control. En muchos casos no hay ni la necesidad ni los datos para hacer predicciones tan precisas, y además se necesita predicciones a más largo plazo. En esos casos la simulación se puede aplicar a la comparación de escenarios, donde los resultados exactos no son tan importantes como el rendimiento de uno en comparación con otro.

Un estudio de cinco conceptos de *buffering* de pacientes usa simulación en este contexto[18]. Debido al coste, y en departamentos de urgencias el peligro potencial en el que se puede poner un paciente, no es práctico probar una cantidad así de nuevas técnicas de gestión del flujo de pacientes en el sistema real. Al contrario una simulación provee la oportunidad de probar las escenarios diferentes sin poner en peligro vidas humanas, dicho proceso se puede repetir en otros hospitales. Lo que tal vez implique solamente cambiar algún parámetro para ajustar la simulación al nuevo departamento.

Las simulaciones que se usan para dichas comparaciones no tienen la misma necesidad de datos precisos que las simulaciones usadas para predecir. La verificación del modelo que conduce la simulación puede ser verificado a un nivel menos estricto porque solo tiene que tener en cuenta las variables que afectan los procesos modelados, y acompañado por un buen conocimiento del sistema - por ejemplo una persona que trabaja ahí - funciona perfectamente como la base de un sistema de ayuda de la toma de decisiones.

#### 3.2.2. Técnicas de simulación

En el ámbito de simulación de departamentos de urgencias, como en otros ámbitos de simulación, hay varias técnicas usadas, incluyendo - entre otros - simulaciones de eventos discretos, Monte Carlo, dinámicas de sistemas, y simulaciones basadas en agentes[37]. En el campo de simulación de departamentos de urgencias las dos técnicas que más se encuentran en la literatura son simulaciones de eventos discretos y dinámicas de sistemas.

Otra técnica de simulación que contiene los requisitos de simulaciones de departamentos de urgencias, y la que se usa para el modelo y la simulación de este trabajo, son los modelos basados en agentes. El capítulo 2 contiene una explicación profunda de esta técnica.

### **Simulaciones de eventos discretos**

Una simulación de eventos discretos se basan en los eventos que representan el comportamiento de un sistema. Además se puede dividir estas simulaciones en las dirigidas por eventos o las dirigidas por tiempo.

Una simulación dirigida por eventos simula los cambios que los eventos producen en el estado del sistema, nada fuera de estos momentos es considerado. Para sistemas que no cambian gradualmente en el tiempo, pero sí lo hacen en momentos distintos, este tipo de simulación puede ser muy eficiente.

Los simulaciones dirigidas por tiempo simulan el paso de tiempo, también en bloques discretos, pero dedicando el igual de importancia a cada paso de tiempo. Una simulación dirigida por tiempo tiene la ventaja de que es conceptualmente más cerca a la realidad para la mayoría de las personas y, por eso, más fácil de entender.

Independiente del factor estimulante de la simulación, eventos discretos simulan el paso de tiempo y también el estado del sistema en bloques discretos. Un método de simulación muy común en eventos discretos, y aún más en la simulación de departamentos de urgencias es la teoría de colas. En un nivel abstracto un departamento de urgencias es un seria de colas, los pacientes esperan en ciertas colas para visitar triaje, después esperan ver a un médico, y posiblemente esperan también para pruebas del laboratorio.

La abstracción del sistema hasta el nivel de colas puede generar una simulación que realmente no represente la diversidad de los pacientes ni de las enfermeras y médicos que los atienden. Este punto se discute más en un ejemplo de campo de este mismo trabajo.

### **Dinámicas de sistemas**

El estudio de dinámicas de sistemas, y su uso en simulación, es basado en sistemas de retroalimentación. Es decir, un sistema donde un componente puede afectar a otro que a su vez, y quizás a través de un número de otros elementos, también afecte al primero.

Aunque se suele encontrar dinámicas de sistemas en modelos estratégicos, el uso en simulación de departamentos de urgencias es de particular utilidad cuando hay distintas partes del sistema que, aunque parecen separados, puede cambiar uno al otro y causar efectos completamente inesperados.

Modelos, y por extensión sus implementaciones en simulaciones, generalmente necesitan menos datos del sistema real que una simulación de eventos discretos. Esto pasa porque estas

simulaciones actúan como una caja negra, por la cual los datos de entrada pasan y salen los resultados, sin un conocimiento detallado de que ha sucedido ahí dentro.

Realmente, las dinámicas de sistemas ocupan un nicho de simulación de departamentos de urgencias bastante distinto y, aunque hay solapamiento entre los campos, por lo general se usan para atacar problemas distintos.

### 3.3. Trabajo relacionado

Medeiros et al. [25] presentaron una simulación desarrollada para probar un nuevo método para mejorar las operaciones del departamento de emergencias del *Hershey Medical Center* en los Estados Unidos. El modelo fue creado específicamente para probar el método de “colas dirigidas por el proveedor”<sup>1</sup> y una implementación fue hecha con el software de simulación Arena.

La simulación del modelo del flujo de pacientes fue implementado usando eventos discretos, lo cual significa que no existía la posibilidad de modelar la heterogeneidad de los proveedores y que las diferencias entre pacientes era limitado a los cinco niveles del Índice de Severidad de la Emergencia (ESI). El ESI es un sistema de clasificación de la agudeza y necesidad de recursos de un paciente con cinco niveles, 1 siendo el caso más grave y 5 la menor. Funciona de una manera muy parecida a muchos otros sistemas de clasificación de triaje.

Para validar la simulación Medeiros et al. se analizaron los resultados del tiempo de visita de pacientes y también un censo del número de pacientes en la cola dirigido por el proveedor. Las dos métricas mostraban intervalos de confianza de 95 % que eran muy aceptables. En comparación con un estudio hecho en el departamento de urgencias del *Hershey Medical Center*, sólo la media del tiempo de visita para pacientes de nivel 4 ESI cayeron dentro del intervalo de confianza.

Estos resultados muestran la dificultad de predecir el resultado de un cambio en un departamento de urgencias con un modelo que no tomar en consideración todos los factores que pueden afectar en cómo un paciente puede pasar por el sistema.

El modelo de Medeiros et al. muestra resultados interesantes, y una implementación que muestra la utilidad de simulación como una herramienta de la validación de nuevos protocolos en un departamento de urgencias sin poner en peligro los pacientes. Sin embargo, el modelo se ha creado para un único uso, y sólo como base de un sistema de ayuda a la toma de decisiones. En este aspecto deja un hueco que se espera llenar el modelo presentado.

La simulación puede ayudar mucho en la comparación de técnicas para mejorar un departamento de urgencias sin la necesidad de probar todos los cambios potenciales. Kolb et al.

---

<sup>1</sup>Provider Directed Queuing del inglés

[18] mostraron la utilidad de simulación en este sentido con la comparación de cinco posibles mejoras para reducir la hacinamiento de departamentos de urgencias usando sitios de espera adicionales.

Usando información de un hospital específico crearon un modelo de la estructura del departamento de urgencias. Con este modelo se ha construido una simulación con la cual se puede probar distintos conceptos para contrastar los efectos que tenían en el flujo de pacientes. Los resultados de las pruebas proveyeron sugerencias para hospitales que tienen problemas con hacinamiento en ciertos partes de su departamento de urgencias.

Como está expresado en el artículo, siempre hay ciertas limitaciones en los resultados de una simulación, pero es la única manera de sacar una idea de cómo los cambios pueden afectar a un sistema sin poner en peligro vidas humanas. En esta instancia una simulación es el compromiso perfecto entre el peligro de cambiar un sistema real contra la inhabilidad de un departamento de soportar la cantidad del nivel de pacientes que hay.

Un punto muy útil de este estudio es la definición de indicadores clave de rendimiento del sistema. Se mostraron la importancia de tener estos indicadores para la comparación de escenarios diferentes, una parte importante del modelo que será presentado.

Al igual del trabajo de Medeiros et al. la simulación de Kolb et al. fue creada para un uso específico, y no está pensada como una herramienta que se pueda sintonizar y usar para varios hospitales.

Como comparación con el modelo presentado el modelo de Kolb et al. tiene buenas características en la comparación de escenarios diferentes y el obvio uso que puede tener en la capacidad de ayudar a la toma de decisiones. Pero parece que es un modelo construido para un solo propósito y no tiene la facilidad de ser configurado para el uso en otros hospitales o con otros escenarios.

El trabajo más similar al que se está presentado se el propuesto por Jones y Evans[17]. También es un modelo basado en agentes y tiene el objetivo de ser una herramienta que se puede utilizar en diferentes departamentos de urgencias usando los parámetros específicos de cada uno.

El simulador tiene 18 parámetros de entrada que se usan para describir el sitio que se desear simular. Cada uno de estos parámetros describe una parte de todo el departamento.

En este momento, aunque la simulación es basada en agentes, solo hay una pequeña parte de ella que aventaja esta técnica de simulación. Cada médico puede tener un valor diferente de número de pacientes que son capaces de atender por hora, pero es la única parte de la simulación que está basada en agentes.

La simulación ha sido validada usando datos de un hospital real. Los valores utilizados como tiempo medio de espera de los pacientes antes de ver al médico, son valores observados en el hospital real estudiado.

Como se ha dicho, este modelo es el más parecido al modelo presentado. Tiene limitaciones en su validación realizada en solo un hospital y que realmente no utiliza todo el potencial de ser un modelo basado en agentes. En adición el desarrollo de este modelo no ha continuado, hecho que impide aprovechar el trabajo hecho hasta este punto.

La simulación *ForcastED* y el modelo que ésta implementa se presenta Hoot et al.[16] Es un sistema para la predicción numérica de índices de sobre población de un departamento de urgencias a corto plazo. La aplicación está prevista como una herramienta para predecir el estado de urgencias dentro de 2, 4, 6, y 8 horas.

Se han identificado siete índices que tienen importancia en la descripción del estado del departamento de urgencias

1. Cuenta de espera; el número de paciente en la sala de espera
2. Tiempo de espera; la media del tiempo desde que los paciente entran a la sala de espera
3. Nivel de ocupación; el número de pacientes en camillas dividido por el número de camillas licenciadas del departamento
4. Tiempo en el sistema; la media del tiempo desde que los pacientes entran en camillas
5. Cuenta de pacientes esperando la admisión al hospital
6. Tiempo para admisión al hospital, la media del tiempo desde una petición para entrar al hospital
7. Probabilidad de desviación de ambulancias

En el trabajo de Hoot et al. se han colectado datos de un hospital durante algunos meses del año 2006, usando el método de la ventana móvil para verificar las predicciones del simulador contra datos reales. Se ha cargado datos de las cuatro semanas antes de una fecha para predecir las próximas ocho horas.

Usando el simulador *ForcastED* se han realizado pruebas utilizando datos de otros departamentos, algo que no se ha realizado en muchos de los trabajos disponibles en la literatura. Se ha encontrado que la herramienta tenía éxito en la predicción de los índices importantes excepto que la cuenta de pacientes esperando admisión al hospital. Los datos mostraban más exactitud en la predicción a dos horas que a ocho.

La diferencia principal que tiene *ForcastED* con el modelo presentado en este trabajo es el enfoque de la simulación. *ForcastED*, como sugiere el nombre, se basa en la predicción numérica del estado de un departamento de urgencias. El modelo presentado tiene previsto ser usado como la base de un sistema de ayuda a la toma de decisiones, donde no es tan importante

el estado exacto de un departamento en corto plazo, pero si son importantes las diferencias relativas entre escenarios diferentes bajo condiciones diferentes (pero más generales que los que presente *ForcastED*).

Un aspecto que se puede perder en la simulación de un departamento de urgencias es el de las consecuencias en cambios de políticas. Esto se refiere a cómo los cambios en un departamento de urgencias pueden afectar al resto del hospital y cómo los cambios en el hospital en general puede afectar al departamento de urgencias que forma parte de ese hospital.

Un método que ha ganado popularidad en los últimos diez años es el uso de dinámicas de sistemas para modelar no solo departamentos de urgencias, sino cómo afectan y son afectados por el hospital en general. En el trabajo de Lane et al. se ha realizado un estudio de un departamento de urgencias usando sistemas de dinámicas para investigar si los recortes en el presupuesto habían generado un servicio inadecuado en los departamentos de urgencias[31].

El modelo define todas las partes del sistema que pueden afectar la operación del departamento de urgencias y maneja las interrelaciones entre la comunidad (de donde vienen los pacientes), el hospital (que tiene paciente previstos y también los que vienen de urgencias) y el departamento de urgencias que tiene pacientes que vienen de la comunidad y en el caso que los pacientes no se puede estar tratados por urgencias tiene que mantenerlos hasta que hay espacio para ingresarlos al hospital.

Es exactamente esta dependencia entre el departamento de urgencias y el hospital (la recepción de pacientes) que se investiga en este estudio. Las conclusiones a las que se han arribado muestran que por dichas interrelaciones será peligroso basar la política del presupuesto en cada departamento individualmente, sino que hay que tener en cuenta el hospital en su totalidad.

El estudio de Taylor et al. muestra unos puntos buenos, pero no modela en profundidad el departamento de urgencias. En vez de considerarlo como una alternativa al modelo presentado, este simulador sería un buen complemento. Un modelo así puede proveer los datos de llegada de pacientes y asignación de espacio en el hospital mismo que el modelo propuesto necesita para sus escenarios, y en su turno un modelo de dinámicas de sistemas puede usar los datos de un modelo más específico para describir mejor esta parte del modelo que es el departamento de urgencias.



## **Capítulo 4**

# **Modelo de Departamentos de Urgencias**

Este capítulo se dedica a explicar el desarrollo de un modelo de departamentos de urgencias aplicando técnicas de modelado basado en agentes.

Los departamentos de urgencias son unos de los lugares más dinámicos y más difíciles de modelar de un hospital, debido a la gran variabilidad en el número y la heterogeneidad de los pacientes que tienen que ayudar. Esta variabilidad existe tanto entre diferentes temporadas del año como en días de semana u horas del día. Además hay eventos externos que, de un momento al otro, pueden aumentar el número de pacientes y la gravedad de las heridas que estos presentan, por ejemplo, incidentes de tráfico.

El modelo que se presenta en este capítulo se ha desarrollado mediante entrevistas con personal de dos hospitales de Cataluña[29].

Se ha elegido un modelo basado en agentes para representar aquel sistema tan complejo, ha explicado en el Capítulo 2, un modelo basado en agentes tiene dos partes principales, los agentes y el entorno. Adicionalmente, se explora el rol que tiene la comunicación entre agentes y como se representa en el modelo.

### **4.1. Los agentes**

Los agentes forman la parte más importante del modelo, y representen cada unidad de un departamento de urgencias que puede actuar, activa o pasivamente. En las próximas secciones se explicará la funcionalidad de los agentes y como representan el comportamiento de todas las personas y otros individuos desde un nivel bajo y como emerge el comportamiento del departamento de urgencias.

## 4.2. Los agentes activos

Todos los individuos que actúan proactivamente son representados por agentes activos, los individuos identificados que actúan de esta manera son todos los actores humanos en el sistema del departamento de urgencias. Se presenta una lista de todos estos individuos en el Cuadro 4.1.

Cuadro 4.1: Individuos identificados como ser representado por agentes activos y los lugares donde interactúan

	Admisiones	Triaje	Tratamiento	Sala de espera
Pacientes	X	X	X	X
Acompañantes de pacientes	X	X	X	X
Médicos			X	
Enfermeros (Triaje)		X		
Enfermeros (Emergencias)			X	
Personal de admisiones	X			

En esta sección se explica como se representa los agentes activos, el modelo que se usa para modelar cada individuo y cómo afecta un individuo al otro.

### Pacientes

Los pacientes son los individuos principales del sistema, y la razón de ser del mismo. Es cierto que un departamento de urgencias no funcionaría sin cada una de las clases de individuos, pero dejaría de tener sentido sin la existencia de los pacientes.

Los pacientes se encuentran en todos los lugares de interacción del departamento de urgencias. Mejor dicho, debido a que el modelo se base principalmente en los caminos que siguen los pacientes por el departamento, los lugares de interacción son aquellos donde se encuentran los pacientes.

Otra vez, por el enfoque del modelo (los propios pacientes) los pacientes están involucrados con casi todos los otros agentes del sistema, aunque no cada paciente interactúa con cada tipo de agente en cada visita. Potencialmente los pacientes tienen interacciones con todos los otros agentes.

## Acompañantes de pacientes

En muchos casos los pacientes no entran al departamento de urgencias solos; por el contrario, van acompañados por otra persona, quien puede ser un amigo, familiar, u otro tipo de acompañante. Los acompañantes tienen un rol muy importante en las interacciones que ocurren dentro de urgencias, más aún cuando hay una razón por la cual un paciente no es capaz de explicar su enfermedad o dolencia.

Un acompañante puede estar presente como apoyo emocionallo cual cambiaría la interacción que tiene el personal del departamento. En el caso de un paciente que tiene problemas de comunicación, y que no hable el idioma local, por ejemplo; el acompañante servir de interprete o traductor, una acción que afecta mucho la calidad de un diagnóstico o en casos extremos en los que el paciente no es consciente, el único que puede explicar la situación sería su acompañante.

Los pacientes pueden ser seguidos por sus acompañantes a todos los lugares de interacción, entonces los acompañantes también se pueden encontrar en todos los lugares modelados de urgencias.

Principalmente los acompañantes interactúan con los pacientes, pero también con cualquier otro agente con el cual el paciente interactúa, desde médicos y enfermeras hasta otros pacientes e incluso otros acompañantes. Un acompañante puede proporcionar la fuerza que impide al paciente sucumbir al miedo o histeria por culpa del dolor; sin embargo dependiendo de la personalidad del acompañante podía darse la situación inversa.remote

## Médicos

Los médicos son probablemente los últimos del personal de urgencias con los que el paciente va a interactuar, pero desde el punto de vista del paciente, son los más importantes. La importancia de un médico es su experiencia y habilidad de hacer la diagnosis de la dolencia o enfermedad del paciente.

Los médicos se encuentran exclusivamente en la zona de diagnosis y tratamiento, donde ven a los pacientes en las consultas donde hacen la diagnosis y también atienden a pacientes que quedan ahí en urgencias para tratamiento u observación.

En circunstancias normales los médicos interactúan con los pacientes y sus acompañantes para de diagnosticar y tratar los pacientes, pero también son importantes las interacciones que tienen los médicos con las enfermeras que trabajan en la zona de tratamiento. Por cuestiones de recursos, el tratamiento de un paciente normalmente es un esfuerzo en equipo, los médicos y las enfermeras trabajan juntos con el mismo objetivo.

Los médicos tienen dos factores principales que se diferencian. Aunque todos los médicos que trabajan en un hospital tienen años de entrenamiento, hay una diferencia en su com-

portamiento profesional que depende de cuanta experiencia tienen trabajando dentro de este ámbito. A un nivel de diagnosis un médico con más experiencia no necesitaría tanto tiempo para hacer una diagnosis que un médico de menor experiencia.

## **Enfermeras**

Hay dos tipos de enfermeras distintas dentro del departamento de urgencias. Las enfermeras de triaje y las enfermeras de la zona de tratamiento, también denominadas enfermeras de urgencias.

Las enfermeras de triaje son el primer personal entrenado con el que se encuentra un paciente durante el proceso de triaje, normalmente un paciente solo va a triaje una vez, aunque si tiene que esperar demasiado tiempo antes de ver a un médico suelen haber regulaciones que estipula que una enfermera de triaje tiene que evaluar al paciente para confirmar que no ha cambiado su estado lo suficiente como para subir su prioridad.

En la zona de tratamiento se encuentran las enfermeras de urgencias, ellas aseguran que los pacientes reciban la atención que necesitan según la diagnosis que han recibido de los médicos del mismo lugar. Dentro de la zona de tratamiento las enfermeras se mueven entre los boxes donde residen los pacientes mientras reciben tratamiento o esperan admisión al hospital.

En triaje, las enfermeras de esta zona interactúan casi exclusivamente con los pacientes. La comunicación con el resto del personal de urgencias es a través del sistema informático. Reciben los pacientes, los inspeccionan e interrogan para determinar el nivel de gravedad de su dolencia o herida. Esta información se pasa al sistema informático donde se añade la información del paciente y se pone al paciente en la línea de espera para ver un médico según el nivel de gravedad.

Las enfermeras de urgencias interactúan con los pacientes que están en la zona de tratamiento, pero también con los médicos que tratan a los pacientes ahí. A veces la zona de tratamiento puede ser un entorno bastante dinámico, donde cada persona tiene muchas tareas pendientes a la vez, y en donde la comunicación entre enfermeras y médicos es de alta importancia.

Todos las enfermeras tienen capacidades diferentes según su propia experiencia. Las enfermeras pueden tener menor o mayor experiencia, la diferencia está en la eficiencia con que trabajan - una enfermera de mayor experiencia tardaría menos tiempo para hacer tareas comparada a una de menor experiencia.

## **Personal de admisiones**

El personal de admisiones pueden ser el primero contacto de un paciente cuando entra un a hospital. Son responsables de coger los detalles personales de los pacientes e ingresar esta

información al sistema informático. Ellos no tienen entrenamiento médico y no están ahí para hacer una diagnosis del paciente, pero son responsables de manejar lo que puede ser a veces una cantidad muy grande de pacientes esperando entrar al sistema.

El primer lugar del departamento de urgencias al que entra un paciente es admisiones. En este lugar hay sitio para esperar la atención de uno de los personal del admisiones. En situaciones normales el personal de admisiones no sale de este lugar, a menos que hayan fallos del sistema informático lo cual les obligaría a llevar documentación personalmente a otros sitios del departamento de urgencias.

En el primer caso el personal de admisiones interactúan con los pacientes y si hace falta con sus acompañantes. Pide detalles personales de los pacientes sus, e ingresa esta información al sistema informático para empezar el fichero del paciente para este visita.

El personal de admisiones también trabaja con más o menos eficiencia según su experiencia que tiene, aunque en este caso la experiencia se gana más rápidamente, pero también se puede perder con igual rapidez por razones de cambios de sistemas o procedimientos.

#### 4.2.1. Máquinas de estado

Un modelo basado en agentes es una técnica de modelado que al fin y al cabo necesita otro tipo de modelado. Cada agente del modelo es también un modelo propio.

Los individuos en un departamento de urgencias pasan de un lugar a otro interactuando con otros agentes. Durante este tiempo como resultado de las interacciones, pero también por las condiciones que tienen los pacientes, cada agente va cambiando su estado. Este comportamiento se representa perfectamente por una máquina de estado, entonces se ha elegido una máquina de estado para modelar todos los agentes. Específicamente los agentes son representados por una máquina de Moore[32].

Una máquina de estado es una forma de modelar un sistema que tiene distintos, y separados, estados. Estos estados se representan por un conjunto de variable de estado, cada variable puede tomar un valor de una serie de posibles valores en cada momento de tiempo - cada conjunto de valores diferentes representa un estado diferente.

Hay dos tipos básicos de máquinas de estado, máquinas de Moore y máquinas de Mealy. Por un lado, las máquinas de Moore tiene una salida que solamente depende del estado en el que está en un momento, lo cual significa que se puede representar la salida como  $O_j$  donde el estado actual es  $S_j$  como se muestra en la Figura 4.1(a). Por el otro lado, las máquinas de Mealy pueden tener una salida distinta para cada combinación de estado actual y entrada, entonces se representa la salida  $O_{jk}$  donde el estado actual es  $S_j$  y la entrada que provoca el cambio es  $I_k$  como se muestra en la Figura 4.1(b).

Los agentes se representan por máquinas de Moore, o sea cada estado sólo tiene una salida distinta.

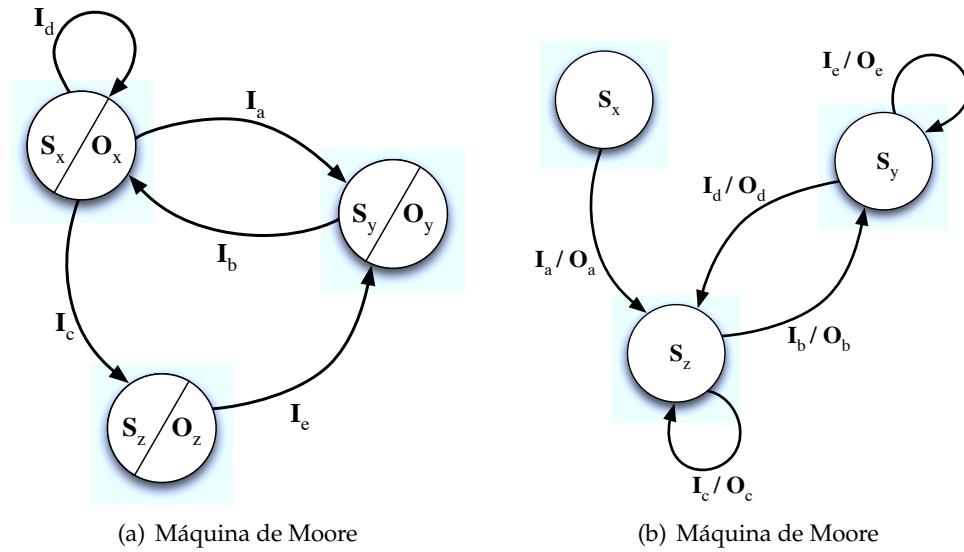


Figura 4.1: Tipos de máquinas de estados

#### 4.2.2. Variables de estado

Los agentes se representan por una máquina de estados, y cada estado individual se diferencia por el conjunto de valores de las variables de estado de aquella máquina.

Las variables se han identificado a través de entrevistas con el personal de dos hospitales diferentes de Cataluña, cada una representa una parte importante de los estados diferentes en los que pueden estar los individuos que se presentan en un departamento de urgencias.

Hay una única máquina de estado para todos los tipos diferentes de agentes en el modelo, entonces hay algunas combinaciones de valores que no tienen sentido y nunca ocurrirán durante la operación del modelo. Aún así es preferible tener una máquina para todos los agentes que máquinas distintas porque, especialmente en el futuro, hay la posibilidad de aumentar el modelo hasta el punto de reflejar la diferencia entre pacientes con niveles diferentes de conocimiento.

#### 4.2.3. Observabilidad de variables

Adicionalmente al conjunto de valores que puede coger cada variable existe la propiedad de observabilidad. La observabilidad de una variable tiene que ver con quien puede adivinar el valor de una variable. Hay tres valores básicos posibles para la observabilidad. Además una variable puede tener algunos valores que son observables y otros que no, o que tiene niveles diferentes de observabilidad.

Una variable, o un valor de una variable, es **observable externamente** ( $E$ ) si otros agentes pueden adivinar el valor de la variable en cuestión sin comunicarse con el agente cuya variable

quieren saber. Hay una restricción a esta habilidad de adivinar el valor de la variable, el otro agente debe estar dentro del mismo lugar que el agente del que quiere leer el valor.

El ejemplo perfecto de una variable observable externamente es Ubicación. Si el agente A está en un lugar, los otros agentes que están en el mismo lugar saben donde está el agente A sin la necesidad de comunicarse con él.

Si una variable o valor no es observable externamente, puede ser **observable internamente** (*I*) si el propio agente puede adivinar el valor. En este caso un agente A conoce el valor de una cierta variable, pero otros agentes no lo pueden adivinar sin comunicarse con este agente.

Una variable observable internamente es el nombre de una persona, esta es información que el agente conoce, pero que otros agentes necesitarían preguntar.

Una variable o valor que no es observable ni externamente ni internamente se denomina **no observable** (*N*). En este momento no hay variables que no sean observables, pero si hay unos valores que no lo son. Hay, por ejemplo, condiciones físicas que no presentan ninguna señal de su presencia, aunque en el caso del modelo de un departamento de urgencias estas condiciones siempre son acompañadas por una síntoma que sí es observable.

Como ya se ha comentado hay variables que tienen valores de distintos grados de observabilidad, son variables de observabilidad parcial, o más específicamente son variables que pueden ser parcialmente observable externamente (*pE*), parcialmente observable internamente (*pI*), y parcialmente no observable (*pN*).

La condición física de un agente representa el mejor ejemplo de una variable parcialmente observable. Un brazo roto es un valor observable externamente, mientras que una jaqueca sería un valor observable internamente. Hay también valores de la condición física que son no observables, como una tenia no es observable ni para el individuo que lo tiene ni para otra persona mirando al agente, aunque seguro que hay síntomas de esta condición física que son observables.

Las variables identificadas se muestran en el Cuadro 4.2, los valores que cada una puede asumir, los cuales son un conjunto relativamente pequeño, están en la segunda columna, la última columna presenta la observabilidad.

### Nombre / identificador

Cada agente tiene un identificador único dentro del modelo. El identificador representa el nombre de una persona, que es especialmente importante para los pacientes, que recibirán llamadas por el sistema de altavoces dirigidos por nombre. También tiene importancia en el sistema informático donde se usa para diferenciar los pacientes.

Cada agente tiene un identificador y son de igual importancia para cada clase de agente.

Cuadro 4.2: Variables de estado y sus valores

Variable	Valor	Observabilidad
Nombre / identificador	Único por agente	<i>I</i>
Detalles personales	Género, historia médica, alergias, origen	<i>I</i>
Ubicación	Entrada del departamento, admisiones, sala de espera, triaje, consultoría, box de tratamiento	<i>E</i>
Acción	Idle, pidiendo información, dando información, moviéndose a otro lugar, <i>tareas específicas</i>	<i>E</i>
Condición física	Constante hemodinámico, índice de Barthel	<i>pE / pI / pN</i>
Síntomas	Trauma serio / moderado, problemas respiratorios, dolor de la cabeza, vomitos, diarrea	<i>pE / pI</i>
Nivel de comunicación	Bajo, medio, alto	<i>E</i>
Nivel de experiencia (médico)	Ningún, residente, subalterno, superior, consultante	<i>pE / pI</i>
Nivel de experiencia (enfermera)	Ningún, bajo, medio, alto	<i>pE / pI</i>
Nivel de experiencia (administrativa)	Ningún, bajo, alto	<i>pE / pI</i>

El valor exacto del identificador no es importante, aunque debe ser distinto para cada agente dentro del modelo.

Este identificador no cambiará mientras el agente represente la misma persona, durante un periodo de tiempo modelado se asume que una persona no cambiará su nombre (o si lo cambia, que hay una enlace implícito entre los dos nombres que está fuera del alcance de este trabajo modelar).

### Detalles personales

Los detalles personales representan los datos específicos que un paciente tendrá que dar al personal del hospital, o que residen dentro del sistema informático, con respecto de su condición. Aunque cada persona tiene muchos datos personales, los únicos modelados son los relevantes. El género del paciente, su historia médica, alergias, y origen de familia.

Los pacientes son los únicos para quienes los detalles personales son realmente importantes, aunque los otros agentes tienen esos datos, su importancia es mínima.

Cada parte de los detalles personales tiene un conjunto de valores, pero en el modelo actual se modela el movimiento de los datos, y no los datos mismos. La importancia de estos datos

está donde residan y quien tiene acceso a ellos - situaciones que afectan la funcionalidad del departamento de urgencias, no las que afectan el estado médico del paciente.

Los valores de esos datos no se cambian durante un tiempo modelado, son los datos que pueden tener algo que ver con la condición del paciente, pero no describen esta condición precisamente.

## Ubicación

Cada agente tiene una ubicación, una parte fundamental en cualquier modelo basado en agentes. La ubicación de un agente representa donde se sitúa de momento a momento. La ubicación física de un agente cambia al actuar bajo ciertas condiciones - un paciente reacciona diferente en un consultorio privado de lo que actuaría en una sala de espera.

La ubicación, como un concepto fundamental del modelo es importante para todos los agentes.

Diferentes clases de agentes pueden estar en lugares diferentes. En el modelo presentado, los agentes se modelan con una ubicación de bastante poca granularidad. Cada agente tiene una localidad a un nivel de salas, o lugares generales. El concepto se explica en más detalle en la Sección 4.5.

Durante un tiempo simulado los agentes se pueden mover de un lugar a otro, cambiando el valor de su ubicación, las limitaciones del lugar en el cual puede estar cada agente depende de su modelo, y no todos los agentes pueden ir a todos los lugares.

## Acción

Los agentes cambian de un lugar a otro, y también cambian la acción. La acción de un agente representa lo que está haciendo el agente en ese momento.

Todas las clases de agentes tienen acciones a realizar, y normalmente esas acciones son las que diferencian los estados de un agente de un paso de tiempo a otro.

La acción de un paciente puede coger un número de valores generales, como ser pidiendo información de otro agente, dando información a otro agente, dos acciones que normalmente constituyen dos lados de una conversación. Para cambiar de lugar un agente pasa por una acción de cambiar de lugar o movimiento que dura una cantidad de tiempo en función de la distancia entre los dos lugares. También el personal del departamento de urgencias realiza acciones que se corresponden con su función en el hospital.

Las acciones son las variables más cambiables durante un periodo modelado, en muchos casos cambiando cada paso de tiempo. Unas acciones tienen duraciones, como la de cambiar lugares, que dejan al agente en el mismo estado hasta que se ha cumplido la acción (por ejemplo llegar al otro lugar).

## **Condición física**

La condición física representa el estado real de una persona. En muchos casos esta condición física no es algo inmediatamente obvio, y es realmente información que no estará disponible hasta la diagnosis del paciente. Pero porque el modelo asigna la condición física cuando un paciente entra a urgencias está conocido abstractamente en esta variable.

Los pacientes son los únicos que tienen un valor útil para esta variable de estado en el modelo actual, sin embargo está previsto que la condición física se extienda a las otras clases de agentes en futuras versiones del modelo, en cuanto uno de los personal de urgencias se puede ser afectado por fatiga al final de un turno, un problema real de departamentos donde el personal tienen que trabajar largas horas.

Un conjunto de índices que describen el estado físico de una persona se usan para la condición física. Se ha tomado la decisión de basar aquella variable en métricas estándares porque son las mismas métricas que un departamento de urgencias tendrá almacenado en casos antiguos y la habilidad de hacer referencia a casos reales usando las mismas métricas será de gran ayuda.

Durante un periodo de tiempo modelado la condición física de un paciente puede cambiar, aunque es probable que cambios grandes no ocurran, es posible que la situación de un paciente empeore, o también mejore, durante su tiempo en urgencias según la cantidad de tiempo de espera.

## **Síntomas**

La parte de la condición física que los agentes pueden intuir, a través de visión, sonido, o sentido directo especialmente en el caso del mismo agente, son los síntomas. En base de estos síntomas, el médico realizará la diagnosis de un paciente.

Al igual que con la condición física los pacientes son los únicos para cuales el valor de los síntomas tiene interés. Los síntomas, desde el punto de vista de la complejidad de diagnosis de un paciente, son más interesantes cuando el valor se transfiere al médico como conocimiento, y se usa esta información para hacer una diagnosis.

Los síntomas son un conjunto de valores posibles que forman el estado del paciente, como ser trauma (de varios niveles), problemas respiratorios, dolor de cabeza, que el paciente vomite o tenga diarrea. Cada conjunto de síntomas es un valor diferente de esta variable de estado.

Esta variable puede cambiar durante un periodo modelado, aunque no se prevé que los síntomas de un paciente cambien mucho durante su tiempo en urgencias. Sin embargo, un cambio de síntomas en un paciente probablemente signifique un avance en la enfermedad, y desde este punto de vista es un evento bastante importante a modelar.

## Nivel de comunicación

Cada persona tiene una cierta capacidad de comunicar, la habilidad de transferir una idea a otra persona, y las diferencias en este capacidad son importantes en las interacciones que ocurren en un departamento de urgencias. El nivel de comunicación de una persona refleja un número de consideraciones. Conocimiento del idioma local, una persona que no habla bien el idioma usado en el departamento de urgencias tendría más problemas describiendo su queja que otra nativa. El conocimiento de términos médicos también cambia la habilidad de explicar una dolencia, un paciente con conocimiento médico o que ha sufrido el mismo problema antes probablemente pueda explicarlo mejor que otra. La última consideración es la habilidad de explicar conceptos abstractos, como el dolor, unas personas tienen una mejor capacidad de simplificar conceptos difíciles a niveles más fáciles de entender.

El nivel de comunicación es importante para todos los agentes porque explica una parte de las interacciones, y todos los agentes participan en interacciones. La habilidad de comunicación de cada agente de una interacción da un valor de cuanto tiempo tardará esta interacción en acabar con éxito.

El nivel de comunicación se modela en tres niveles, puede ser bajo, una persona con dificultades con el idioma; medio, una persona normal, pero sin ningún conocimiento muy específico de la situación; o alto, una persona que además de tener una buena capacidad de comunicación, también tiene conocimiento previo de la situación lo cual le ayuda a comunicarse con otros.

El nivel de comunicación de una persona no suele cambiar durante un periodo de tiempo modelado, aunque puede ser que un paciente gane experiencia de como explicar su dolencia mientras está hablando con una enfermera de triaje y después sea más capaz de explicarla de mejor manera a un médico durante la diagnosis. Este nivel de detalle se deja para futuras iteraciones de la implementación del modelo.

## Nivel de experiencia (médico)

Todos los médicos de un departamento de urgencias no suelen tener la misma experiencia, unos tendrán más experiencia que otros, y por eso serán más eficiente en su trabajo diario. El nivel de experiencia de un médico afecta el tiempo que dura en hacer la diagnosis de un paciente, y también en la probabilidad que esta diagnosis sea correcta.

La experiencia de un médico, como implica el nombre, está actualmente sólo una variable que tiene importancia para médicos. Sin embargo, en futuras iteraciones del modelo se modelarán los casos de pacientes que tiene formación como médico y por eso son más fáciles (o más difíciles) de tratar.

El nivel de experiencia de un médico se divide en cinco niveles, o tipos. Un agente puede

no tener ninguna experiencia, y en niveles de experiencia puede ser un residente, subalterno, o superior. Los tres niveles de entrenamiento representan años de experiencia trabajando en un ámbito de medicina, también puede ser un consultante, que significa que tienen otros conocimientos de especialidad.

Durante un periodo de tiempo modelado un médico no cambiará su nivel de experiencia de medicina, la experiencia está en años de entrenamiento, y la diferencia de unas horas o días no representa un cambio significativo.

### **Nivel de experiencia (enfermera)**

Las enfermeras también tienen un nivel de experiencia que las diferencia una de la otra, una enfermera de más experiencia en triaje no tardará tanto tiempo cumpliendo los requisitos del proceso de triaje como otra de menor experiencia. Una enfermera de urgencias será más rápida, pero también más independiente cuanto más experiencia tenga.

Como la experiencia de un médico, esta variable se limita a sólo una clase de agente, enfermeras. Aunque en futuras iteraciones del modelo puede ser útil modelar el conocimiento extra de un paciente, en el modelo actual la experiencia como enfermera se restringe a tener importancia para enfermeras.

La experiencia de una enfermera se divide en tres niveles, o ninguna experiencia - el valor que tendrán todos los agentes que no sean enfermeras. Los tres niveles, bajo, medio, y alto representan años de experiencia dentro un ámbito de salud.

El nivel de experiencia que tiene una enfermera no cambiará durante un periodo de tiempo modelado; al igual que la experiencia de médicos está también basado en años de conocimiento y la diferencia que tiene en días u horas es mínima.

### **Nivel de experiencia (administrativa)**

El proceso de admisiones es una tarea administrativa, y como muchas otras tareas, una persona con experiencia en el sistema puede trabajar más rápido que una persona sin este conocimiento. La experiencia en el proceso de admisiones en un departamento modelado se representa como el nivel de experiencia administrativa.

En el modelo actual solo el personal de admisiones tiene un nivel de experiencia administrativa que afecta su comportamiento dentro del modelo de urgencias. En futuras iteraciones esta experiencia, específicamente con el sistema informático, puede extenderse al resto del personal de digitalizada para representar sus habilidades administrativas. En una época en la que casi toda la información está digitada, la habilidad de usar sistemas informáticos puede afectar a todos los trabajadores dentro de un hospital, médicos y enfermeras.

El nivel de experiencia administrativa sólo tiene dos valores modelados aparte del valor para ninguna experiencia que tienen todos los agentes que no forman parte del personal de admisiones. Un nivel bajo significa una entrenamiento básico con el sistema informático, el personal de admisiones sabe como usarlo pero no tiene mucha experiencia. Un nivel alto significa una persona con conocimiento bueno del sistema que es más rápido en hacer todas las tareas administrativas.

El tiempo que se tarda en ganar experiencia con un sistema informático no es igual al tiempo de entrenamiento en medicina o enfermería, aunque tampoco cambiarán significante dentro de un día. Sin embargo un cambio drástico, como el cambio del sistema informático, o más frecuentemente un fallo de aquel sistema, se modela como bajando la experiencia administrativa de todo el personal del departamento mientras se les entrena en la nueva situación. Esta baja instantánea tendría más efecto en un modelo donde la experiencia administrativa se extiende a los médicos y las enfermeras también, representando el caos temporal que resulta de un fallo del sistema informático.

#### **4.2.4. Entradas**

Las entradas son las que guían los cambios de estado de las máquinas de estado que representan los agentes activos. El próximo estado de un agente depende del estado actual, el conjunto de valores de las variables de estado, más la entrada en un momento dado.

Las entradas representan todas las maneras que un agente puede acumular información. En el caso de una persona, esto representa todo que la persona ve, escucha, huele, sabe, o siente, aunque realmente la mayoría de las entradas representan visión o sonidos - esas entradas son la comunicación que recibe el agente.

#### **4.2.5. Salidas**

Las salidas de una máquina de estados representan todas las maneras en las que un agente puede comunicarse con otros agentes. Como los agentes se representan por máquinas de Moore cada estado sólo puede tener una salida distinta; también es posible que un agente no tenga ninguna salida para un estado, que se corresponde con una situación donde una persona no comunica nada a un nivel significativo para el modelo.

Las salidas para agentes no sólo son lo que dice un agente, un agente puede comunicarse sin decir ni una sola palabra. Por ejemplo, cuando un agente entra a un nuevo lugar su presencia se comunica a cada individuo que está también en ese lugar, pero no indica que el agente haya hablado, solo que los otros agentes notan el cambio. Esta comunicación implícita está explicada en más detalle en la Sección 4.4.

#### 4.2.6. Tabla de transiciones

La tabla de transiciones tiene toda la información sobre el estado siguiente para cada combinación de estado actual y entrada para todos los agentes. Hay dos variantes de la tabla de transiciones, la primera - y más básica - es determinística y representa como actúan los individuos en promedio, la segunda es una tabla estocástica y añade la posibilidad de representar comportamiento menos previsible. Además, la versión estocástica puede representar aún más la individualidad de los agentes.

##### Transiciones determinísticas

Una máquina de estados tradicional tiene transiciones de estados determinísticas. La tabla de transiciones tiene una línea para cada combinación única del estado actual  $S$  y entrada  $I$ . Con estos dos datos la tabla refiera a un estado nuevo al que la máquina cambiará en el siguiente paso de tiempo. Ya que es una máquina de Moore, la definición del estado también define la salida  $O$  para ese estado.

La forma de representar las relaciones entre estados con una tabla de estados se muestra en el Cuadro 4.3.

Cuadro 4.3: Tabla con transiciones determinísticas

Estado actual / salida	Entrada	Estado siguiente / salida
$S_0 / O_0$	$I_a$	$S_i / O_i$
$S_0 / O_0$	$I_b$	$S_j / O_j$
$S_0 / O_0$	$I_c$	$S_k / O_k$
:	:	:
$S_x / O_x$	$I_b$	$S_y / O_y$
$S_x / O_x$	$I_d$	$S_z / O_z$
:	:	:

##### Transiciones estocásticas

El modelo de un agente, hasta este punto, es un modelo determinístico, un agente en un estado específico que se presenta con la misma entrada va a responder exactamente igual otra vez que ocurra.

La realidad es que un ser humano no suele actuar así, las personas son entidades muy, muy complicadas que se comportan de maneras diferentes bajo lo que parecen ser las mismas condiciones. Eso sólo se puede describir una persona racional, una persona en un estado con mucha carga emocional se comportaría de manera aún más impredecible. Es exactamente este estado de mucha emoción el que prevalece en un ámbito como un departamento de urgencias.

Es difícil modelar una persona bajo condiciones normales, y con este modelo no se intenta representar cada individuo con precisión perfecta, es más importante capturar la cambiabilidad de una situación en la que una persona suele actuar diferente cuando se presenta con el mismo escenario dos veces seguidas.

Por esta razón hay una extensión estocástica de la tabla en la forma de transiciones probabilísticas. Una columna adicional se añade a la tabla y cada combinación de estado actual y entrada puede tener más que un estado siguiente. El estado siguiente está elegido en el momento de la transición basado en la elección aleatoria de uno de los posibles estados.

Cada posible estado siguiente tiene un peso, la probabilidad de que este estado sea elegido. Para cada combinación de estado actual y entrada todas las probabilidades suman 1. Entonces un estado actual  $S_x$  con la entrada  $I_a$  y  $k$  posibles estados siguientes tendría pesos de probabilidad representado en la ecuación 4.1.

$$p_1 + p_2 + \cdots + p_k = 1 \quad (4.1)$$

Los pesos de probabilidad se definen en el modelo de los agentes y funcionan como una columna adicional de la tabla de transiciones. El Cuadro 4.4 se muestra en como una combinación de estado actual y entrada ahora puede tener más de un estado siguiente, lo cual se elige aleatoriamente a través de los valores de los pesos.

Por ejemplo, si hay un paciente esperando en una sala de espera para ser atendido, en estado  $S_x$ . Desde el altavoz se escucha el nombre del paciente y las instrucciones para ir a una sala de triaje, la entrada  $I_j$ . Ahora, en lugar de tener pacientes que siempre van a triaje cuando le llaman, es posible que ese paciente no vaya. En un caso normal,  $I_j / p_1$  el paciente va a triaje, pero también hay la posibilidad que - por alguna razón el paciente no escuche su nombre, no entienda las instrucciones etc. - el paciente que no va, representado por  $I_j / p_2$ .

La probabilidad de que el paciente haga una cosa u otra depende de los valores de los dos pesos,  $p_1$  y  $p_2$ .

Cuadro 4.4: Tabla con transiciones estocásticas

Estado actual / salida	Entrada	Probabilidad	Estado siguiente / salida
:	:	:	:
$S_x / O_x$	$I_a$	$p_1$	$S_y / O_y$
$S_x / O_x$	$I_a$	$p_2$	$S_z / O_z$
$S_x / O_x$	$I_a$	$p_3$	$S_x / O_x$
:	:	:	:

## Representación de la individualidad

Personas diferentes no suelen actuar igual bajo las mismas condiciones. Cada persona tiene tendencias de comportarse de una manera u otra, pero al mismo tiempo pueden desviarse de esta norma por un gran número de razones.

Como ya se ha dicho, el modelado de seres humanos es muy complicado, pero en ciertas condiciones la complejidad se reduce bastante. Aquí no se modelan personas, se modelan pacientes, médicos, enfermas, etc. Cada una es una persona, pero una persona que se comporta dentro de un rol, una situación que reduce la cantidad de acciones significativas considerablemente.

Aunque aquellas personas se comportan de acuerdo a un rol cada una, siguen siendo individuales, y uno de las ventajas más grandes del modelado basado en agentes es la habilidad de modelar individuos distintos. Las transiciones probabilísticas permiten modelar la individualidad a través de los pesos de probabilidad de las transiciones.

Siguiendo el ejemplo de la sección anterior, cada paciente situado en la sala de espera, tiene la posibilidad de irse o quedarse en la sala de espera cuando le llaman por la altravoz. La probabilidad de cada opción será diferente para cada individuo. Hay personas que restan más o menos atención a los anuncios y por eso tiene más o menos probabilidad de ir cuando son llamados.

Para asegurar la integridad del modelo, los pesos de probabilidad se quedan fuera de la tabla de transiciones. Cada individuo tiene su propia tabla de pesos de probabilidad, se muestra en la Figura 4.2. Ese método se usa para evitar romper un modelo válido a través de un cambio hecho para un individuo, el modelo se valida para todas las posibles transiciones y los pesos sólo cambian el comportamiento de los agentes dentro del modelo validado.

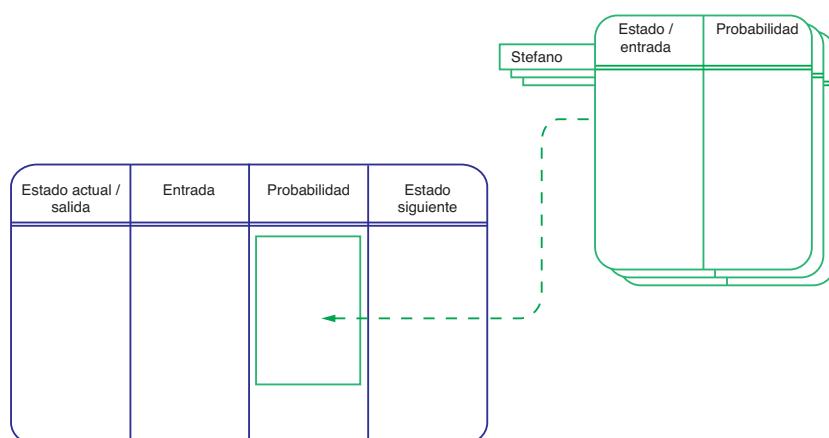


Figura 4.2: Pesos de probabilidad individuales

### **4.3. Los agentes pasivos**

Dentro de un sistema de un departamento de urgencias existen individuos pasivos algunos de los cuales son fundamentales para la operación del departamento en un nivel u otro. Los individuos pasivos no actúan solos, sino que reaccionan a las acciones de los individuos activos.

Se identificaron cuatro tipos de agentes pasivos que se modelarán, los cuales se definen en el Cuadro 4.5.

Cuadro 4.5: Individuos identificados a ser representados por agentes pasivos

Sistema Informático
Altavoces (sistema de anuncios)
Tubos neumáticos
Laboratorios

Los tres agentes pasivos son una parte fundamental del departamento de urgencias donde están presentes. Dichos agentes pasivos no tienen la misma complejidad que los agentes activos, ya que no son entidades que se muevan por el departamento.

Por este motivo los agentes pasivos no son modelados como máquinas de estado, en algunos casos porque una máquina de estados es demasiada compleja y por ello no hace falta. En otros porque a diferencia de una persona un ordenador es capaz de cambiar de estados tan rápida que, a un nivel de funcionalidad, se considera que está haciendo más de una cosa a la vez. Este concepto de estados múltiples no se modela bien con una máquina de estados.

Una diferencia muy importante entre agentes pasivos y activos radica en que los primeros no siempre ocupan lugares exactamente iguales que como lo hacen los agentes activos. Un ejemplo de como funciona es el sistema informático, debido a que realmente es un servidor central que se conecta a unos terminales en sitios diferentes del departamento no tiene un lugar fijo.

En el resto de este sección se explica la importancia de cada entidad modelada como un agente pasivo y se describe cómo está modelado este agente.

Cada uno de estos sistemas modelados con agentes pasivos tiene la posibilidad de presentar fallos en mayor o menor cantidad. Dichos fallos se han definido como trabajo futuro, pero algunas de las implicaciones de ellos y como pueden afectar el funcionamiento del departamento de urgencias se explica en esta sección.

#### **4.3.1. Sistema Informático**

Como casi todos los servicios hoy en día, los departamentos de urgencias tiene un gran nivel de informatización. El sistema informático es un sistema centralizado que gestiona los

datos de pacientes y ayuda a la comunicación de información entre las subsecciones que componen el departamento de urgencias.

El sistema informático tiene dos responsabilidades en el modelo. La primera es almacenar datos importantes de cada paciente. Estos datos los carga el personal de admisiones cuando llega un paciente, una vez cargados, estos estarán disponibles para los médicos y enfermeras del departamento. La segunda es gestionar las listas de pacientes esperando en cada parte del departamento de urgencias.

## Modelo

Un sistema con la habilidad de almacenar datos y responder a peticiones para esta información es suficiente como sistema informático. Un modelo basado en un número de tablas de información es utilizado y cada tabla cumple con más funcionalidad específica.

- Datos de pacientes dentro del departamento
- Lista de pacientes esperando triaje
- Lista de pacientes esperando diagnosis
- Lista de enfermeras de triaje esperando pacientes
- Lista de médicos esperando pacientes

En cada una de estas tablas, el sistema informático es capaz de almacenar nueva información como insertar una nueva línea en la tabla, leer una línea cuando se recibe una petición para acceder a datos de un empleado del departamento o borrar una linea cuando no se necesita la información más. También en el caso de los datos de pacientes, el sistema informático puede añadir información a una linea o cambiar la información que tiene.

El sistema informático sólo se modela con la funcionalidad necesaria durante el periodo de tiempo que se modela. Por esta razón datos permanentes como el historial médico de un paciente no están incluidos en el modelo del sistema informático.

Todos los datos existentes dentro de las tablas del sistema informático son generados por los agentes activos. El sistema informático no crea datos, solo se encarga de almacenar y distribuir datos insertados por el personal del departamento de urgencias.

## Comunicación

El sistema informático se comunica con los agentes activos que representan el personal del departamento de urgencias a través de terminales existentes en todos los lugares de interacción

del modelo. La comunicación se modela igual que la comunicación entre agentes descrita en la sección 4.4.

Como se mencionó anteriormente el sistema informático no tiene un lugar fijo, pero los agentes activos pueden comunicarse con él desde cualquier lugar donde exista una terminal del sistema informático. La comunicación entre terminales diferentes y el servidor central se modela instantáneamente, y se considera que en el tiempo modelado esta comunicación ocurre tan rápido que es equivalente a tener un sistema único.

## Fallos

En un mundo ideal los sistemas informáticos no se fallarían nunca, pero la realidad es diferente. Hay muchas circunstancias en las cuales se podría producir un fallo en la funcionalidad del sistema informático. Fallos entre una o más terminales, en el servidor central o simplemente en la red de interconexión podrían ser la causa por la cual es sistema informático dejase de funcionar.

Al producirse un fallo en el sistema, la información que antes era accesible, se tiene que trasladar físicamente, una situación que genera grandes repercusiones para el rendimiento del departamento.

### 4.3.2. Altavoces

La comunicación a distancia es una parte importante de la funcionalidad de un departamento de urgencias. Esta comunicación se produce a través de un sistema de anuncios dentro del mismo departamento. Si uno del personal del departamento necesita llamar a un paciente que está ubicado en una sala de espera pueden hacerlo mediante el sistema de anuncios evitando la necesidad de ir a la sala de espera.

## Modelo

Los altavoces son modelados como una forma especial de comunicación. Es un medio que permite al personal del departamento de urgencias comunicarse con todos los individuos que están situados en un lugar sin la necesidad de estar en el mismo lugar.

En lugar de que una enfermera se comunique directamente con otro agente, podía usar el sistema de anuncios por ejemplo.

El tiempo que tarda este anuncio en llegar a su destino es igual de si el agente usando el sistema de anuncios estuviese en el lugar hablando, es decir no hay retraso modelado.

## **Comunicación**

Los altavoces son probablemente los más pasivos de todos los agentes del mismo tipo, ya que son un medio de comunicación en sí mismos y no tienen la necesidad de comunicarse con o recibir comunicaciones de otros agentes. El sistema de anuncios se puede considerar una extensión del modelo de comunicación.

## **Fallos**

Como un facilitador de comunicación, un fallo en el sistema de anuncios puede provocar grandes consecuencias. El personal de un departamento de urgencias que emplea altavoces para la comunicación con pacientes a distancia depende de este sistema para la fluidez de la operación del departamento.

La falla de altavoces implicará un contacto más personal con los pacientes, lo cual significaría un retraso en el tiempo de atención tanto para médicos como para enfermeras.

Un efecto secundario de este caso es que es más probable que otro paciente se acueste al personal del departamento mientras van a una sala de espera. Aunque este acto puede parecer un servicio más personal, el tiempo extra que implica puede tener un efecto serio en la eficiencia del departamento.

### **4.3.3. Tubos neumáticos**

Los grandes hospitales, con una cantidad importante de pacientes, suelen utilizar un sistema de tubos neumáticos para facilitar la comunicación de objetos físicos entre departamentos de la misma forma que el sistema informático permite la distribución rápida de datos de pacientes, los tubos neumáticos permiten la diseminación de pruebas y otros objetos físicos alrededor del departamento de urgencias y también entre este departamento y otras partes del hospital.

## **Modelo**

Una gran diferencia entre un sistema de comunicación electrónico, como por ejemplo un sistema informático, y un sistema de tubos neumáticos es la falta de repetibilidad de la comunicación. Un sistema de tubos neumáticos solo puede trasladar objetos, no puede duplicarlos.

Excepto por aquella diferencia, un sistema de tubos neumáticos funcionar de manera muy similar al sistema de altavoces. Es una facilitador de comunicación entre puntos físicamente separados del departamento de urgencias, un médico puede mandar una prueba de un paciente al laboratorio para su procesamiento sin ni la necesidad de desplazarse físicamente de su lugar de trabajo.

## **Comunicación**

Al igual que los altavoces, los tubos neumáticos se pueden considerar una extensión más que otro tipo de agente, cuando se habla de comunicación. Los tubos neumáticos no suelen comunicarse con otros agentes.

## **Fallos**

El sistema de tubos neumáticos representa una gran ayuda dentro de un departamento de urgencias que tiene uso de tal aparato, pero no es imprescindible para su funcionamiento.

En el caso que ocurre un fallo en los tubos neumáticos, los personal del departamento de urgencias tendrían que volver a trasladar las pruebas entre departamento si mismos, o posiblemente con la ayuda de los personal de soporte.

### **4.3.4. Laboratorios**

Uno de los recursos fijos del departamento de urgencias son los laboratorios. Depende del hospital exactamente que son los laboratorios disponibles para pruebas de pacientes del departamento de urgencias. En algunos casos estos laboratorios están propios del departamento, en otros son fuera y compartido con el resto del hospital.

## **Modelo**

Los laboratorios se modelan como un conjunto de recursos con interrelaciones de dependencias entre ellos. El tiempo que tarda en procesar una prueba depende de la prueba en sí misma, de los recursos humanos que tiene el laboratorio y la cantidad de trabajo que este laboratorio tiene en ese momento.

Aunque hay personas que trabajan en los laboratorios, las interacciones existentes con el personal de urgencias no afectan mucho el proceso y, siguiendo el concepto de mínimo complejidad, no se considera necesario aplicar todo la complejidad de interacciones humanas en este caso. Por lo tanto, se modela un laboratorio como una entidad única con ciertos parámetros de recursos.

## **Comunicación**

Los laboratorios tienen un lugar fijo y se comunican con el personal del departamento de urgencias a través de algún agente pasivo que facilita comunicación o cuando un agente activo físicamente va al laboratorio, la representación del modelo de aquel individuo hablando con uno de los personal de laboratorio.

## Fallos

Un fallo en un laboratorio puede ser parcial o completo. Durante un fallo parcial algunas funcionalidades del laboratorio no están disponibles, mientras otras no son afectadas. Por el contrario, un fallo completo deja a todo el laboratorio fuera de servicio.

En los dos casos uno o más servicios no estarán disponibles. Si hay redundancia en los laboratorios, por ejemplo si otro laboratorio puede procesar las pruebas que el primero no puede, el resultado sólo sería un posible aumento en el tiempo de procesamiento de una prueba. Sin redundancia, el personal de urgencias tendrá que buscar otra forma de hacer la diagnosis o dejar al paciente esperando hasta que el laboratorio entre en funcionamiento otra vez.

## 4.4. La comunicación

Una parte básica de cualquier modelo sociológico es la comunicación. En el modelo explicado existe la posibilidad de comunicación entre todos los agentes. Como ya se ha explicado también hay agentes pasivos que en su forma de comunicación se comportan más como una extensión al modelo de comunicación.

En esta sección se explican los modelos de comunicación, la anatomía de un mensaje, y como unos tipos de agentes pasivos funcionan como extensiones al modelo de comunicación.

### 4.4.1. Modelos de comunicación

Hay tres modelos de comunicación, cada uno se diferencia en el destinatario o los destinatarios del mensaje, la comunicación con un individuo singular, con un grupo de individuos o con todos los individuos de un lugar. Los tres se presenta en la Figura 4.3.

#### Comunicación uno a uno

El tipo más básico de comunicación es cuando un individuo se comunica con otro que se muestra en la Figura 4.3(a), y se denomina la comunicación uno a uno (o 1-to-1). En el modelo, el mensaje tiene una fuente, un destinatario y el contenido. El destinatario está implícito, esto representa la forma en que las personas dirigen su atención a la persona con la quién hablan.

La mayor parte de las comunicaciones en las que participan los médicos y enfermeras consisten en comunicaciones uno a uno. Cuando un médico pregunta a un paciente sobre su condición física se modela como una comunicación donde el médico es la fuente del mensaje, el paciente es el destinatario, y el contenido es la pregunta. El médico no tiene que decir explícitamente el nombre del paciente cuando le habla, el destinatario del mensaje puede

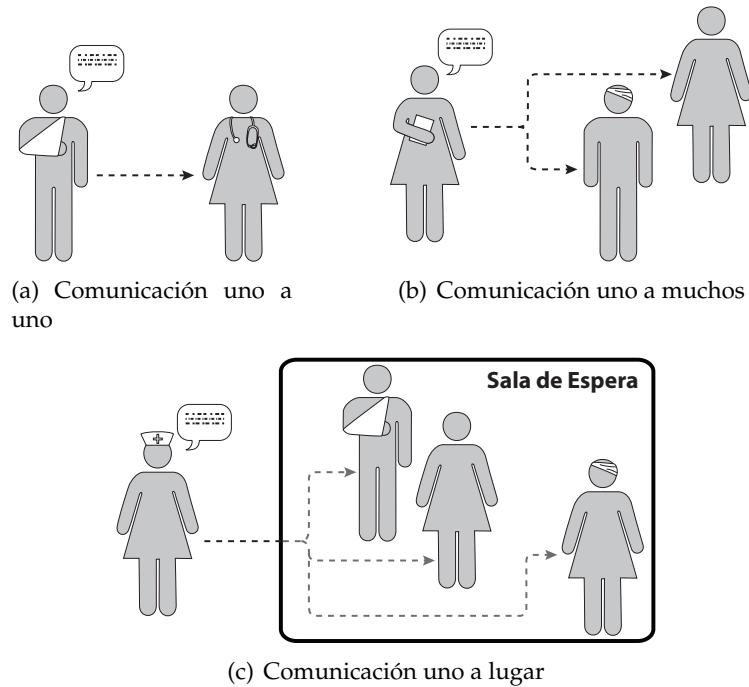


Figura 4.3: Tipos de comunicación

representar el contacto de ojos, la postura del médico y otros factores que implican con quién está hablando.

### Comunicación uno a muchos

Cuando un agente tiene que comunicarse con más de un agente pueden dirigir su comunicación a un conjunto de agentes como se presenta en la Figura 4.3(b). En este caso el mensaje tiene una fuente, y el contenido como comunicación uno a uno, pero a más de un destinatario.

El ejemplo más común de esta forma de comunicación es cuando un paciente acompañado por alguien más. Puede ser un amigo o familiar que por razones de soporte emocional, ayuda en la comunicación. En este caso el personal del departamento de urgencias probablemente dirigirá su comunicación a ambos, el paciente y su acompañante.

### Comunicación uno a lugar

Hay situaciones en las que un agente tendrá la necesidad de comunicarse con todos los agentes que se ubican en un cierto lugar del departamento de urgencias. Se modela la comunicación como una fuente, el destinatario es especificado como el lugar pero los agentes que reciben el mensaje son todos los que están en ese lugar cuando se recibe la comunicación de la

manera presentado en la Figura 4.3(c), el contenido sería igual al de otro tipo de comunicaciones excepto que adicionalmente se podría especificar el destinatario actual en el contenido.

Un ejemplo de este último caso puede darse, cuando una enfermera anuncia el próximo paciente que tiene que ir a triaje. La fuente del mensaje sería la enfermera que llama al paciente, el destinatario sería la sala de espera, que incluye a todos los pacientes que esperan ahí. El contenido en este caso sería primero un destinatario explícito, probablemente el nombre del paciente y una petición de presentarse en una de las salas de triaje.

#### 4.4.2. Comunicación pasiva

Para los individuos que conforman el departamento de urgencias la manera más normal de comunicarse es hablando o mediante un lenguaje de señas. Adicionalmente, hay otra forma de comunicación, denominada comunicación pasiva.

La comunicación pasiva involucra todas aquellas formas de comunicación que las personas normalmente realizan de forma inconsciente. Como el lenguaje corporal, estado físico o simplemente ubicación geográfica. Este tipo de comunicación se modela explícitamente como un tipo de comunicación uno a lugar.

Cuando un individuo entra en un lugar los individuos que se encuentran ahí dan cuenta del incremento den el número de individuos, aunque el paciente no diga nada.

En el caso de admisiones por ejemplo, cuando un paciente entra en este lugar el personal de admisiones dará cuenta de que ha llegado un nuevo paciente y pide que acerque la estación para explicar sus razones por estar ahí en el departamento de urgencias. Si hay otros pacientes ya esperando en admisiones también reciben la comunicación que ha entrado otro paciente, pero en la mayoría de casos no van a reaccionar a esta información en una manera determinada. La Figura 4.4 muestra este fenómeno.

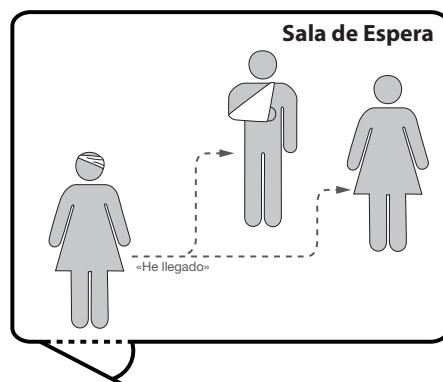


Figura 4.4: La llegada de un nuevo paciente resulta en una comunicación pasiva

La comunicación pasiva es un ejemplo de comunicación “uno a lugar” donde no hay ningún individuo que sea el destinatario en concreto. Si hay otro individuo en este lugar para

que la información que ha llegado un nuevo paciente, por ejemplo, tenga una acción entonces el agente va a responder, si no la comunicación pasiva se ignora todos.

#### **4.4.3. Estructura de un mensaje**

Un mensaje consta de tres partes distintas, la fuente, el o los destinatarios, y el contenido. Cada parte representa información vital para la comunicación entre dos o más individuos.

##### **Fuente**

La fuente de un mensaje es el agente que ha comunicado, de donde ha venido el mensaje. Aunque en muchos casos esta información estaría implícita, por ejemplo cuando un individuo escucha a otro hablar sabe de donde viene la comunicación porque puede verlo.

A un nivel del modelo, tener la fuente es importante porque cuando un agente se comunica con otro agente, el segundo necesita saber a quien tiene que dirigir su respuesta. Sin la fuente la siguiente parte de la comunicación no tendría destinatario.

##### **Destinatario**

Un mensaje tiene que tener por lo menos un destinatario. El destinatario es el individuo que recibe el mensaje, considerando la posibilidad de algún tipo de fallo en comunicaciones.

En el caso de comunicaciones uno a uno, solamente existe un único destinatario.

La comunicación “uno a muchos” tiene un conjunto de destinatarios enlazados de alguna manera. Puede ser que todos los destinatarios formen parte de un grupo en el mismo lugar o que sean una pareja a los que otro agente puede dirigir la comunicación.

Un caso diferente es la comunicación “uno a lugar”. En este tipo de comunicación el destinatario es un lugar, o sea todos los agentes que se encuentran en aquel lugar en aquel momento cuando se transmite la comunicación. Dependiendo del contenido del mensaje la información puede o no estar dirigida a todos los agentes.

En el caso en que una enfermera esté llamando a un paciente específico y ubicado en una sala de espera, el contenido del mensaje sólo tendría un recipiente previsto y haría falta un destinatario explícito en el contenido del mensaje.

##### **Contenido**

Para que un mensaje tenga sentido, este debe tener un contenido que puede ser instrucciones, una pregunta, información o una de muchas otras opciones. El contenido del mensaje es

la parte que causa que un agente activo actúe y cambie de estados o a un agente pasivo, como el sistema informático, a cambiar los datos almacenados en su memoria.

Como se ha explicado anteriormente, el contenido también puede tener información explícita sobre la fuente y el o los destinatarios del mensaje. En el caso de comunicación por un medio que oculta al agente como fuente del mensaje, este agente puede añadir información sobre su identidad al contenido del mensaje; sin embargo, no siempre sería necesario. Más usual es el caso donde sería necesario añadir información sobre el destinatario prevista al contenido del mensaje. Hace falta, por ejemplo, en el caso de comunicación uno a lugar que un agente en el lugar determinado se identifica como el agente que debe reaccionar a un mensaje.

#### **4.4.4. Agentes pasivos como extensiones al modelo de comunicación**

Anteriormente se mencionó que hay unos agentes que actúan como medios de comunicación. El sistema de anuncios y los tubos neumáticos son los que más afectan la comunicación. La comunicación entre dos individuos se puede representar fácilmente cuando consiste en encuentros cara a cara, pero es más difícil de hacerlo cuando se toman en cuenta tecnologías que permiten hablar a distancia.

Por esta razón existen agentes pasivos, que no se comunican con otros tanto como facilitan la comunicación entre otros agentes, o a distancia a múltiples destinatarios o que permitan la comunicación de objetos. Los dos agentes pasivos identificados en esta categoría en este momento son los altavoces y el sistema de tubos neumáticos.

Los comportamientos de aquellos agentes pasivos se describen en más detalle en la Sección 4.3.

### **4.5. El entorno**

Una parte importante de cualquier modelo basado en agentes es el entorno. Sin el entorno no hay lugar en el que los agentes puedan interactuar entre sí. En este modelo el entorno es el departamento de urgencias, acciones fuera de este lugar no se consideran y los agentes no pueden existir fuera del departamento, aunque en un nivel conceptual los agentes vienen de algún otro lugar y cuando salen del departamento de urgencias van a otro lugar.

#### **4.5.1. Granularidad de los lugares**

La manera en la que el entorno se divide y representa la ubicación de los agentes dentro del mismo es muy importante. Después del análisis del funcionamiento del departamento de urgencias se ha decidido que una subdivisión del entorno en lugares de interacción sería

suficiente para el nivel de complejidad actual del modelo. Un esquema genérico de un departamento de urgencias se muestra en la Figura 4.5.

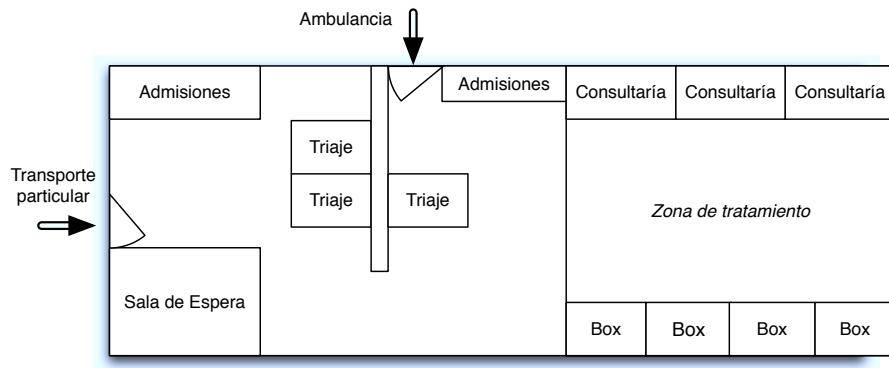


Figura 4.5: Representación del entorno

Las acciones de los agentes dependen del lugar de interacción en el que se encuentran; un paciente por ejemplo, se comportará diferente si se encuentra en una sala de espera o en una de triaje. Sin embargo, el comportamiento del agente no cambia con cambios de ubicación más finos.

Un agente que se encuentra en una sala de triaje de un departamento que tiene varias salas de triaje no se va a comportar diferente entre una sala y otra. La subdivisión de triaje en un departamento de urgencias real existe para la privacidad de los pacientes y se sigue con esta subdivisión en el modelo para dejar claro los recursos existentes, no para definir comportamiento diferente.

Aunque la Figura 4.5 se parece un plano de planta de un departamento de urgencias, en un nivel del modelo no sea necesario. Un gráfico de interconexión, como el de la Figura 4.6, podría representar la misma información. Solo que se usa el plano de planta porque es más obvio para personas no técnicas de entender como se ha dividido el entorno.

#### 4.5.2. Lugares de interacción

Se ha definido cuatro lugares distintos de interacción. El comportamiento de un agente puede cambiar dependiendo del lugar en que se encuentre. El Cuadro 4.6 muestra los diferentes lugares en los cuales interactúan los distintos tipos de agentes.

##### **Admisiones**

El primer lugar de contacto de un paciente dentro de un departamento de urgencias es el de admisiones en el cual se puede encontrar al personal de admisiones y también a acompañantes de pacientes. Normalmente no se encuentra otro personal de urgencias en este lugar.

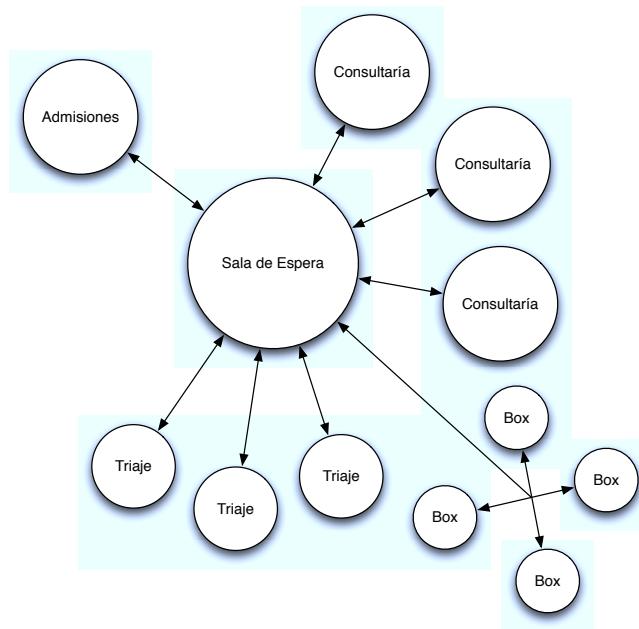


Figura 4.6: Representación del entorno como interconexión

Cuadro 4.6: Lugares y los agentes que interactúan de ellos

Lugar	Agentes
Admisiones	Personal de admisiones, pacientes, acompañantes de pacientes
Triaje	Enfermeras de triaje, pacientes, acompañantes de pacientes
Diagnóstico y tratamiento	Médicos, enfermeras de emergencias, pacientes, acompañantes de pacientes
Sala de Espera	Pacientes, acompañantes de pacientes

Cuando un paciente entra a Admisiones, este forma parte de una cola para hablar con alguna persona del personal de admisiones. En cuanto es su turno el paciente se acerca a uno de los agentes del personal de admisiones, el cual pide detalles personales necesarios para registrarlos en el sistema informático. En la mayoría de los casos, después de dicha interacción los pacientes se dirigen a una sala de espera.

El personal de admisiones no evalúa pacientes por la gravedad de sus heridas o dolencias, pero debe reconocer cuando un paciente tiene alguna necesidad urgente y llamar a las enfermeras de triaje para recoger al paciente inmediatamente.

### Triaje

Triaje es el primer lugar donde un paciente es examinado por una enfermera de triaje. Presentes están una enfermera de triaje, los pacientes y quizás el acompañante del paciente si hace falta para soporte o ayuda lingüística.

Dicha enfermera sigue un guión, electrónico o en papel, y realiza una serie de preguntas sobre el estado del paciente, a través de la cual, la enfermera asigna un número de gravedad al paciente. La mayoría de hospitales un muchas partes del mundo usan un sistema de cinco niveles donde 1 es el más grave y 5 el menos[36][9][35].

En casos normales, después de triaje el paciente vuelve a una sala de espera antes de ser visto ve por un médico. Si el paciente se encuentra en grave estado de salud, será trasladado directamente a diagnosis y tratamiento.

### **Diagnosis y tratamiento**

La zona de diagnosis y tratamiento es donde pacientes son atendidos por médicos tomando en cuenta sus dolencias o heridas. En este lugar, interactúan los paciente, sus acompañantes, médicos y enfermeras de emergencias.

Diagnosis y tratamiento es un lugar bastante complejo con respeto a las interacciones entre agentes. Hay consultorios donde los médicos ven a los pacientes que no necesitan una camilla directamente para diagnosis y camillas para pacientes que quedarán más tiempo en urgencias. Las enfermeras de emergencias rotan entre las camillas para asegurarse de que los pacientes tienen todo lo que necesitan.

Después del tratamiento el paciente sale del departamento de urgencias y puede dirigirse directamente a su casa o admitirse al hospital como paciente del mismo.

### **Sala de espera**

En dos partes de su camino por el departamento de urgencias hay la posibilidad que paciente tendrán que esperar un tiempo en la sala de espera. En la sala de espera se encuentran pacientes y también los acompañantes.

Realmente la sala de espera puede estar divida en dos o más salas por sección de la progresión por el departamento donde está el paciente, o por tipo de herida. En ambos casos, es un lugar donde los pacientes se quedan esperando y, interactuando entre ellos, en algunos casos la separación busca dar un sentimiento de avance al paciente.

Los dos pasos donde el paciente tiene que esperar la mayoría de su tiempo en un departamento de urgencias son antes de ver una enfermera para el triaje, y después otra vez antes de ver un médico para diagnosis. Si un paciente no tiene la necesidad de una camilla para tratamiento, pero tienen que esperar los resultados de una prueba, es posible que tendrán que volver a una sala de espera después de diagnosis también.



# **Capítulo 5**

## **Simulador**

Este capítulo está dedicado a explicar el simulador del modelo de departamentos de urgencias y su desarrollo.

### **5.1. El modelo implementado**

El modelo que se describió en el capítulo anterior se ha implementado en un simulador para probar su funcionalidad.

#### **5.1.1. La reducción de complejidad**

El modelo descrito en la sección anterior tiene una complejidad bastante elevada. Un problema con la validación de sistemas complejos es que cuando se encuentra un problema o una anormalidad en los resultados de la simulación, que no ocurre en el mundo real, existen un gran cantidad de parámetros que podía causar esa disparidad.

Una solución a este problema, y un buen método para el modelado y simulación de cualquier sistema, es el método de complejidad mínima[33]. Es decir, la simulación inicial implementa lo mínimo posible que podía acercar el modelo lo suficiente a la realidad para tener utilidad.

El simulador en el primer caso puede ser sintonizado a un sistema real, usando solo los parámetros escogidos como los más importantes o más influyentes. Si la simulación no es capaz de acercarse lo suficiente a la realidad se puede añadir más complejidad, pero de forma paulatina.

La razón principal por la que usar este método es que aumentando la complejidad en pasos pequeños y realizando la validación después de cada paso, se puede evitar realizar

búsqueda detalladas cuando las simulaciones no funcionan correctamente y presentan muchos parámetros.

Por estas razones el simulador que se presenta en este capítulo implementa un modelo de complejidad reducida, los parámetros implementados se explicarán a lo largo del capítulo.

## 5.2. Algoritmo

El simulador del departamento de urgencias se basa en el modelo ya descrito. El simulador se conduce por tiempo. El tiempo se divide en intervalos discretos, idénticos de periodo y en cada paso de tiempo los agentes del sistema actúan.

Cada paso de tiempo se divide en dos fases. Si suponemos que el simulador está en el tiempo  $t$ , las fases son los siguientes:

- Primero, cada agente procesa las entradas de la última fase,  $I_{t-1}$  y según esa entrada y el estado en lo que se encontraba durante el último paso ( $S_{t-1}$ ) cambia a su nuevo estado  $S_t$ .
- Segundo, cada agente emite su salida para su estado actual,  $O_t$ . Esta salida será la entrada que usa los receptores para cambiar al estado siguiente.

Por la arquitectura de los ordenadores, cada agente ejecuta cada una de esas fases en serie, pero la implementación asegura que ejecutan de tal manera que se simula que cada agente pasa por la primera fase al mismo tiempo, y después todos pasan por la segunda fase a la vez también.

Las dos fases y los pasos intermedios que las constituyan se detallan a lo largo de esta sección.

### 5.2.1. Cambiar estado

En cada paso de tiempo cada agente cambia de estado. Es posible que cambie al mismo estado que tenía en el estado anterior, pero no obstante existe un cambio.

Primero el agente busca la línea de su estado actual (todavía permanece en el estado del intervalo de tiempo anterior anterior) en la tabla de transiciones. La línea se encuentra definida por los valores para las variables de estado que tiene en este momento el agente.

En cuanto encuentre la línea de su estado actual, comienza la búsqueda de la *sublínea*, o línea de transición, que se asocia con la entrada que ha recibido. Si el agente no recibió una entrada en el último paso o si la entrada que ha recibido no tiene una transición para ese estado, la transición de omisión será utilizada.

Cuando se ha encontrado la línea de transición, el agente toma los nuevos valores de sus variables de estado. Una vez asignados estos nuevos valores, el agente ya ha cambiado el estado. La última acción es actualizar la visualización del agente - ponerlo en su nuevo lugar, si lo cambiado.

### 5.2.2. Salida

Por razones de coherencia del simulador, las salidas de cada agente se procesan una vez que todos los agentes han cambiado estado. Esto asegura que los agentes no confundan las entradas de un intervalo de tiempo con las de otro.

Cada agente busca la línea de estado para su estado actual (ahora el estado actual es el estado del intervalo de tiempo actual) en la tabla de transiciones. Debido a que los agentes se representan por máquinas de Moore, la salida se define a un nivel del estado, independientemente de la entrada que ha recibido.

Después de encontrar la salida asociada con el estado en lo que está, el agente manda la salida en forma de mensaje. En este mensaje hay información sobre a qué otros agentes va dirigido el mensaje, si es un único agente, un grupo o todos los agentes de un lugar. Con esta información el agente envía el mensaje.

En el otro lado de la comunicación hay un agente o más que reciben el mensaje. Ese agente cuando recibe el mensaje lo guarda para el paso siguiente, que será cuando lo usará para escoger el próximo estado.

## 5.3. Máquina de simulación

La máquina de simulación que se ha elegido como base del simulador es NetLogo porque tiene todas las características que se necesitan para implementar un modelo de este tipo. NetLogo es un entorno de simulación de modelos basados en agentes.

Como extensión de la familia de aplicaciones Logo, NetLogo está escrito en Java y funciona en todos los sistemas operativos más usado, pero los modelos creado en NetLogo están escrito en su propia lenguaje de programación, un dialecto de la lenguaje Logo[34] bastante simple con funciones y atributos especializados para la simulación de sistemas basados en agentes.

NetLogo también tiene visualización empotrada que ayuda en la depuración de código. Pero el uso más importante de la visualización es que muestra la funcionalidad del simulador de una manera sencilla de entender para aquellos usuarios que no tenga una base de ciencia computacional.

### 5.3.1. Generador de números aleatorios

Una faceta importante para una simulación estocástica es la calidad del generador de números aleatorios para las operaciones aleatorias. NetLogo usa la implementación de Java del algoritmo Mersenne Twister. Ese algoritmo tiene un periodo de  $2^{19937} - 1$ [24], mucho más que los requisitos del simulador que ahora sólo usa un número de la serie aleatoria para cada llegada del paciente (para calcular el tiempo entre pacientes según el proceso Poisson).

## 5.4. Implementación de la máquina de estados

NetLogo provee una base como máquina de simulación del sistema basado en agentes, pero el comportamiento de los agentes se implementa en el nivel superior al nivel base de NetLogo. La máquina de estados que conduce el comportamiento de los agentes es la parte más importante del simulador, es la guía de todas las interacciones que suceden durante la simulación.

El modelo de la máquina de estados que se explica en el capítulo anterior es una máquina de estados pura, que permite la correcta definición del modelo, pero a la hora de implementar tiene algunas desventajas. La tabla de transiciones que define la máquina de estados tiene un bloque para cada individuo representado en el sistema, además cada uno de estos bloques tiene un número variable de filas que depende del número de otros agentes del modelo.

Para solucionar este problema se propone un nuevo tipo de máquina de estado, una máquina de estados relativa. Una máquina de estados relativa funciona como una máquina de estados normal, pero los valores de las variables de estado que caracterizan el próximo estado se puede definir en términos del estado actual y la entrada que provoca el cambio de estado. Las salidas de los estados se pueden definir de la misma manera.

Para ilustrar el concepto se presenta una situación simple, se muestra en el Cuadro 5.1 un extracto de una tabla de estados para un paciente. Se muestran los posibles estados siguientes para un paciente haciendo cola en admisiones.

La fila *a*) representa al paciente recibiendo un mensaje que le dirige al punto de inscripción de admisiones, específicamente al personal de admisiones que le envía. El valor de la variable de Acción sería acercarse al agente que le envió el mensaje. El valor de la variable Lugar es Admisiones, o sea el paciente no va a cambiar lugar.

En la fila *b*) se muestra el caso en que un agente del personal de admisiones se percata de que el paciente tiene una herida grave y le manda directamente a otro lugar, para que el proceso de inscripción se haga ahí. Este lugar puede ser Triaje, o directamente Diagnosis, y el siguiente estado queda definido con este mensaje de cambio de lugar.

En las dos filas discutidas el valor de la variable Contador no ha sido de ninguna importancia, de modo que el campo se rellena con *NI* para indicar que *no importa* cual es el valor

Cuadro 5.1: Sección de tabla de estados de un paciente

Estado actual			Entrada		Estado Siguiente	
Lugar	Acción	Contador	Mensaje	Lugar	Acción	Contador
:	:	:	:	:	:	:
a) Admisiones	Hacer cola	NI	"Siguiente paciente"	Admisiones	Acercar $Msg(Fuente)$	0
b) Admisiones	Hacer cola	NI	"Va a Lugar <sub>x</sub> "	Admisiones	Acercar admisiones	0
c) Admisiones	Hacer cola	0	-	Salida	Salir departamento	0
d) Admisiones	Hacer cola	NI	-	Admisiones	Hacer cola	$Contador_{t-1} - 1$
:	:	:	:	:	:	:

que tiene. En la fila *c*) se indica que esta fila sólo se elige cuando el estado del agente presenta el valor de Contador a 0 y además no presenta entrada. Esta fila significa que el paciente ha llegado al fin de su paciencia, y saldrá sin ser atendido.

La última fila, *d*), muestra el caso de omisión, es decir si no hay ninguna entrada que tiene una fila definida y tampoco hay otra linea - como la linea *c*) - que corresponde a un estado actual mejor. En este caso el estado siguiente será igual que el actual excepto que el contador - que ahora se sabe que representa la paciencia del paciente - disminuirá en uno.

Un punto importante en la definición de la tabla de transiciones es que existen campos en el estado actual con el valor *NI*, o *no importa*. Se puede ver, como filas *c*) y *d*) en el ejemplo cuando el valor de la variable Contador es 0, que hay 2 o más filas que corresponden a la misma combinación de estado actual y entrada. La regla siempre debería ser que la fila más específica, es decir, con menor número de campos *NI* gana, porque sino la dicha fila nunca corresponderá con ninguna situación.

#### 5.4.1. Tiempo en la simulación

En el simulador el tiempo pasa en momentos discretos denominados tics, una unidad fija con una relación lineal con el tiempo simulado. Cada tic representa el tiempo más pequeño en el cual puede ocurrir algún cambio de estado de los agentes que residen dentro del modelo.

El simulador está configurado de tal manera que diez tics de tiempo en el simulador representan un minuto de tiempo en el sistema real que está modelado.

### 5.5. Interfaz gráfica

Una de las ventajas de las simulaciones de modelos basados en agentes es la visualización. Ver una simulación ejecutándose suele ser la manera más fácil de mostrar a una persona que no está familiarizado con las tecnologías de modelado y simulación como funciona el simulador. Si una imagen vale más que mil palabras, ¿qué valdría más que el simulador corriendo con agentes que visualmente muestran la representación de personas?

NetLogo tiene una interfaz gráfica incorporada en la herramienta, con la que se puede representar fácilmente el estado de una simulación. Se muestra la interfaz gráfica de la ventana de NetLogo en la Figura 5.1.

Las herramientas disponibles en NetLogo permite de forma sencilla construir una interfaz del usuario que sea fácil de entender. Hay opciones de controles y botones que se puede usar para permitir al usuario cambiar parámetros del simulador antes de lanzar una nueva simulación.

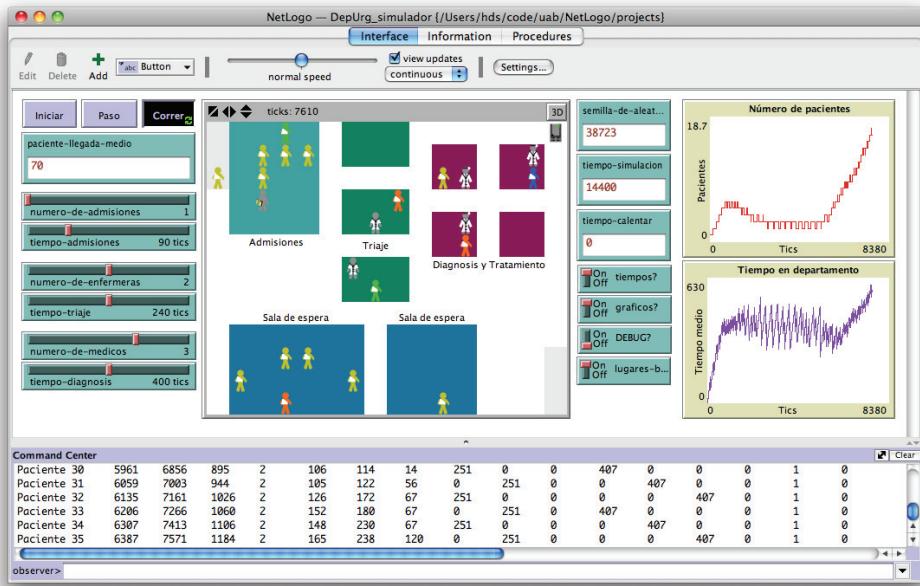


Figura 5.1: Interfaz de NetLogo (con simulador corriendo)

La simulación tiene controles que permiten el usuario cambiar los parámetros, configurar el comportamiento y la salida del simulador y también gráficos para una rápida vista del progreso de la simulación. Se muestra los componentes de la interfaz del simulador en la figura 5.2.



Figura 5.2: Interfaz gráfica del simulador

El estado de la simulación se muestra en el centro de la pantalla, denotado por la A. Cada lugar está etiquetado con el nombre, y además se diferencian los lugares por colores. Los agentes se representan por figuras con aspectos de personas. Los clases de agente se diferencian por aspectos diferentes; los agentes que representan al personal del departamento de urgencias

tienen el cuerpo gris mientras los pacientes están coloreados por nivel de gravedad - asignado cuando entran a la simulación.

Hay controles para Iniciar el simulador, dar un Paso o Correr el simulador, denotado por la B. El botón de correr el simulador sigue activado hasta que el usuario lo pulsa otra vez para parar la simulación o hasta que la simulación llega al número máximo de tics.

Los controles de los parámetros del simulador permiten el usuario configurar ejecuciones diferentes, los controles se denota por la C. Existe un control para el promedio, en tics, del proceso Poisson que programa las llegadas de los pacientes (*paciente-llegada-medio*). Las llegadas de pacientes cambian durante el día, y el control de la interfaz representa el mínimo intervalo entre llegadas que ocurre durante el día. El cambio del intervalo medio entre llegadas no hay opción de cambiarlo en la interfaz, aunque se puede cambiar en el código fácilmente. Los seis controles mostrados en la parte inferior son para determinar el número de cada clase de agente que represente al personal de urgencias (*numero-admisiones*, *numero-enfermeras*, y *numero-medicos*), y sus tiempos de atención respectivos en tics (*tiempo-admisiones*, *tiempo-triaje*, y *tiempo-diagnosis*).

A la derecha de la figura de la simulación hay tres parámetros más que controlan el comportamiento del simulador, que se denota la letra D. El primero es la semilla de aleatoriedad (*semilla-de-aleatoriedad*) que especifica la semilla para la próxima ejecución. La habilidad de especificar ese valor permite repeticiones del mismo patrón de pacientes pero con cambios en otros parámetros, además si el usuario pone un valor de cero la semilla es especificada por el simulador. Abajo están los controles del tiempo de ejecución - el tiempo total de una ejecución (*tiempo-simulacion*) y el periodo para calentar el simulador (*tiempo-calentar*). El tiempo total de una ejecución es la suma de estos dos valores.

Abajo de los controles del tiempo están dos opciones de salida denotadas por la letra E. La primera opción controla si los tiempos de los agentes son impresos a la consola (*tiempos?*). Los tiempos se puede usar para hacer un análisis *off-line* de la ejecución. La segunda opción controla si los gráficos se actualizan (*graficos?*). Los gráficos proveen información adicional de la historia del estado de una simulación, pero se tiene en cuenta la posibilidad de que el usuario no quiera esa información ya que la ejecución se realizaría de manera más lenta.

Los gráficos que se describe en el párrafo anterior se denotan por la letra F. Los gráficos trazan dos variables sobre el tiempo de la ejecución de una simulación en tiempo real. El primero muestra el número de pacientes que ocupan el departamento de urgencias en cada tic, y el segundo muestra el promedio del tiempo de espera para todos los pacientes que están dentro del departamento en ese tic. El simulador tarda un poco más tiempo cuando tiene que actualizar los gráficos y por eso existe la opción descrita arriba, para no utilizarlos.

## 5.6. Simulaciones paramétricas

### 5.6.1. La necesidad de simulaciones paramétricas

El simulador se usará como la base de un sistema de ayuda a la toma de decisiones[30]. Un sistema de ayuda a la toma de decisiones no tiene porque ser un sistema de predicciones numéricas. Puede proporcionar opciones diferentes, complementando el conocimiento del usuario y ayudar a organizar la información en una forma más fácil de interpretar que los datos brutos.

Como base de un sistema de ayuda a la toma de decisiones, el simulador tendrá que ejecutar varias simulaciones con combinaciones de valores de parámetros diferentes. Cada combinación de valores representa un escenario diferente de la simulación, una configuración distinta. Todas las configuraciones forman el espacio de parámetros.

Hay un gran número de combinaciones de valores que se componen el espacio de parámetros. En el modelo de complejidad reducida hay seis parámetros que describen la configuración del departamento de urgencias. En los experimentos hechos, cada parámetro podía tomar entre dos y cinco valores, lo cual generaba en un gran número de escenarios, con cinco valores para cada uno de los tres tiempos de atención con uno a dos personal de admisiones, uno a tres enfermeras y uno a cuatro médicos se ha llegado rápidamente a 1500 escenarios como se muestra en la ecuación 5.1.

$$\begin{aligned} n_{escenarios} &= n_{numero\_admisiones} \times n_{tiempos\_admisiones} \times n_{numero\_enfermeras} \times \\ &\quad n_{tiempos\_triaje} \times n_{numero\_medicos} \times n_{tiempos\_diagnosis} \\ &= 1 \times 5 \times 3 \times 5 \times 4 \times 5 \\ &= 1500 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Solamente con el modelo sencillo que se usa en el simulador actual, hay un número bastante elevado de combinaciones de valores de parámetros, suficientemente grande de modo que no hay la posibilidad de lanzar cada uno manualmente. Por esta razón se requieren simulaciones paramétricas, una manera en la que el simulador lanza un conjunto de simulaciones, todos con combinaciones de valores de los parámetros diferentes.

### 5.6.2. BehaviourSpace

NetLogo tiene un sistema llamado BehaviourSpace que permite ejecutar simulaciones paramétricas. Con un fichero de configuración, o configuraciones hechas dentro de la propia simulación se puede determinar los parámetros y los valores que se quiere probar para cada uno. Entonces BehaviourSpace calcula el número de ejecuciones necesarias para probar cada uno de las posibles combinaciones de dichos valores de los parámetros.

Usando BehaviourSpace la simulación se puede lanzar en un modo que permite la no visualización de la ejecución, reduciendo el tiempo necesario para completar la simulación. Sin embargo, los 1500 ejecuciones tardarían mucho tiempo.

En general el tiempo de computar un intervalo de tiempo de una simulación basada en agentes es el producto del tiempo que se tarda en simular las acciones de un agente y el número de agentes dentro del mundo de la simulación en este paso. En el modelo descrito los agentes dentro de la simulación son el personal del hospital y los pacientes. Durante la simulación el personal del hospital es fijo, no entra a ni sale de la simulación. Por otro lado los pacientes están constantemente entrando a y saliendo de la simulación. Esto cambia la carga de cada intervalo de tiempo de la simulación basando en la Ecuación 5.2 que calcula el tiempo de ejecución  $T_i$  en el paso  $i$ , con el número de personal del hospital  $h$ , el número pacientes en la simulación en el paso  $i$ , y el tiempo de ejecución de un agente  $T_{agente}$ .

$$T_i = (h + p_i)T_{agente} \quad (5.2)$$

Suponiendo que el tiempo de ejecución de un agente es fijo. Entonces lo que se cambia es el número de personal del hospital, que no cambia por tiempo, y el número de pacientes en cada paso de la simulación. Para una simulación que dura  $n$  pasos se representa en la Ecuación 5.3.

$$T = (hn + \sum_{k=1}^n p_k)T_{agente} \quad (5.3)$$

Una configuración buena realizada con el objetivo de reducir el tiempo de espera para los pacientes, también saldrá con un tiempo de ejecución menor porque ya que los pacientes esperan menos tiempo porque hay menos pacientes dentro del sistema a la vez, reduciendo el valor de  $p_k$ .

El tiempo de ejecución de cada escenario se sitúa entre 152 y 238 segundos en una máquina de escritorio y una ejecución de todos los escenarios con una semilla de aleatoriedad tarda 306,108 segundos. Para asegurar un cierto grado de validez estadística los ejecuciones se debe repetir varios veces con una selección de semillas.

El tiempo necesario para ejecutar esta cantidad de simulaciones representa otra problema, ya que se tiene que encontrar los recursos para ejecutar 340 horas de simulación cada vez que se quiere correr las simulaciones. La respuesta viene del proyecto *Oliva* de la Universitat Autònoma de Barcelona, una implementación de condor[20] que permite ejecutar tareas en máquinas de laboratorios mientras nadie las usa. NetLogo puede ejecutar desde la linea de comandos sin una interfaz gráfica, lo cual significaba que se pueden realizar ejecuciones por grupos de escenarios en el sistema de condor, las cuales serán ejecutadas durante la noche o a otras horas cuando nadie usa esas máquinas.

# **Capítulo 6**

## **Validación y Análisis**

Este capítulo se dedicada a la validación del simulador descrito en el capítulo anterior contra el modelo desarrollado y también un análisis del modelo a través del simulador validado.

### **6.1. Validación**

Una fase importante en el desarrollo de un simulador es la validación de dicho simulador contra el modelo que implementa. La validación es vital para asegurar que el análisis que se hace con resultados de la simulación obtiene resultados que coinciden con el modelo desarrollado. En cuanto se empieza a usar el simulador se tiene que estar seguro de que los resultados proviene del modelo, y no son artefactos de la implementación.

El modelo que se ha realizado tiene ciertas ventajas para su implementación, ya que la principal forma de modelar un agente es una máquina de estados. Las máquinas de estados son una construcción concreta, y presenta una implementación distinta a la de un algoritmo de lenguaje natural. La máquina de estados además permite que la comparación entre el modelo descrito y el modelo implementado se pueda ver directamente.

La forma de validar una implementación de una máquina de estados es mediante la tabla de transiciones. Dos máquinas con la misma tabla de transiciones se comportarán de la misma manera. Sin embargo, debido a que la tabla de estado muy grande, el simulador no la implementa directamente, pero en su lugar emplea una tabla relativa en la cual una fila puede representar múltiples filas de la tabla de transiciones completa.

Para construir la tabla de transiciones reducida se hace una operación de reducción, y realmente la validación del simulador es la validación de esta operación, que produce una tabla reducida que es fiel a la tabla original y que no pierde información en la transición. La forma de validar esta operación es mostrar que tiene una operación inversa que puede reproducir la tabla de transiciones completa a partir de la tabla reducida.

### 6.1.1. Próximo estado basado en la entrada recibida

Una de las reducciones usadas es que el próximo estado se puede definir en base de la entrada que provocó el cambio a este estado. Por ejemplo, desde la primera sala de espera un paciente puede recibir una mensaje que lo dirige a una de las tres unidades de triaje. Debido a que hay tres unidades de triaje la tabla completa necesita tres filas diferenciadas, como se muestra en el Cuadro 6.1(a). Se puede reducir estas tres filas a una en la tabla reducida, como se muestra en el Cuadro 6.1(b), que usa un parámetro en el mensaje para elegir el siguiente estado.

Cuadro 6.1: Extracciones de la tabla de transiciones para un paciente en una sala de espera

(a) Extracción de la tabla completa

Estado actual		Entrada	Estado siguiente	
Lugar	Acción	Mensaje	Lugar	Acción
Sala de Espera 1	Idle	"Va a Triaje 1"	Sala de Espera 1	Ir a Triaje 1
Sala de Espera 1	Idle	"Va a Triaje 2"	Sala de Espera 1	Ir a Triaje 2
Sala de Espera 1	Idle	"Va a Triaje 2"	Sala de Espera 1	Ir a Triaje 3

(b) Extracción de la tabla reducida

Estado actual		Entrada	Estado siguiente	
Lugar	Acción	Mensaje	Lugar	Acción
Sala de Espera 1	Idle	"Va a" <lugar>	Sala de Espera 1	Ir a <lugar>

Debido a que el número de salas de triaje es un parámetro del modelo, es información que existe fuera de la tabla de estados, es decir, es una descripción del entorno donde habitan los agentes. Entonces es una sencilla operación empezar con una única fila del Cuadro 6.1(b), y multiplicarla por el número de posibles destinos que tiene un paciente desde la primera sala de espera, para llegar a la representación de las tres filas del Cuadro 6.1(a).

### 6.1.2. Salida basada en el estado actual

Usando el mismo escenario que en la sección anterior se considera que el paciente ha llegado a la sala de triaje donde lo dirigieron - en este ejemplo el destino final es la sala de triaje 2. Cuando el paciente recibe un mensaje de la enfermera que pide sus síntomas, responde con el valor de este variable de estado. En el caso de la tabla de transiciones completa, habrá un estado para cada síntoma diferente que puede tener el paciente, como se muestra en el Cuadro 6.2(a) (la tabla se ha cortado, hay más síntomas que se mostrarían aquí). La tabla reducida puede sustituir todos los síntomas para esta acción a un valor de *no importa* en la tabla de transiciones, y después usar el valor de esta variable de estado como el contenido de la salida para este estado.

Cuadro 6.2: Extracciones de la tabla de transiciones para un paciente en triaje

(a) Extracción de la tabla completa

Estado actual			Salida	
Lugar	Acción	Síntoma	Destinatario	Contenido
Triaje 2	Da información de síntoma	Tos	Enfermera 2	"Tos"
Triaje 2	Da información de síntoma	Brazo roto	Enfermera 2	"Brazo roto"
Triaje 2	Da información de síntoma	Vómitos	Enfermera 2	"Vómitos"
:	:	:	:	:

(b) Extracción de la tabla reducida

Estado actual			Salida	
Lugar	Acción	Síntoma	Destinatario	Contenido
Triaje 2	Da información de síntoma	<i>no importa</i>	Enfermera 2	$\langle$ síntoma $\rangle$

La operación de reducción esencialmente reduce el número de filas necesarias para representar un conjunto de estados, en este caso por no representar al valor de la variable que representa el síntoma que presente el paciente. Sin embargo, todos los síntomas posibles son definidos; de tal modo que para hacer la operación de expansión, se toma la única fila del Cuadro 6.2(b) y multiplicarla por todas las posibles síntomas, dando lugar al conjunto de filas del Cuadro 6.2(a).

## 6.2. Análisis

El análisis del modelo sigue unos pasos que analizan sus propiedades de manera que se pueden extraer conclusiones del comportamiento del modelo. En unos casos un paso necesita los resultados de uno o más pasos anteriores para configurar las pruebas. El modelo se analiza a través de la implementación en el simulador

El análisis consiste en:

1. Número de repeticiones necesarias para un intervalo de confianza
2. Tiempo que tarda el modelo en calentar
3. Comportamiento del modelo con llegadas de pacientes diferentes; las llegadas siguen la misma distribución, pero con semillas de aleatoriedad diferentes
4. La sensibilidad de los índices a cambios en cada parámetro

### **6.2.1. Número de repeticiones**

Como se ha descrito en el capítulo anterior el simulador permite definir la semilla de aleatoriedad para cada ejecución. Este cambio permite un análisis del modelo bajo condiciones de validez estadística. Es importante saber cuantas repeticiones serán necesarias para sacar conclusiones válidas sobre el comportamiento del modelo.

El análisis del modelo se hace para cinco grados de libertad, uno por cada uno de los parámetros que controlan el número de cada clase de agente que representan el personal del departamento y sus tiempos de atención respectivos. Según la t Student Tabla[23] para un intervalo de confianza de 99 % se necesita 3.143 repeticiones para asegurar que los resultados son estadísticamente válidos.

### **6.2.2. Índices**

El modelo, ejecutado a través del simulador, se puede medir por unos ciertos índices de interés que resumen su comportamiento durante el tiempo simulado. Esos índices son propiedades del sistema real, el departamento de urgencias, que son de interés de los responsables.

Se ha identificado seis índices de interés, que se usará para hacer un análisis del modelo.

#### **Tiempo de atención**

El tiempo de atención de un paciente es el tiempo que ese paciente está dentro del departamento de urgencias. La medida incluye todo el tiempo desde el momento que entran por admisiones hasta que salen después de la fase de diagnosis y tratamiento.

El valor que produce una simulación es el promedio de todos los pacientes que han sido atendidos durante el tiempo modelado. Este valor tiene un rango entre el tiempo mínimo que es el requerido por un paciente para pasar por el departamento modelado (los tiempos de atención de las tres fases de interacciones más el tiempo de transito entre cada lugar) y el “peor caso” que es el tiempo modelado si los únicos pacientes que se atienden entran al principio del tiempo modelado y salen en el último momento.

#### **Tiempo de espera (sala 1)**

Este índice mide el tiempo que cada paciente está en la sala de espera 1, que es la sala de espera entre admisiones y triaje.

El valor que produce una simulación es el promedio del tiempo que cada uno de los pacientes han sido atendidos durante el tiempo modelado. Este tiempo tiene un rango entre cero y el tiempo modelado menos el resto del tiempo de atención en el mismo “peor caso”

descrito para el tiempo de atención - pero un “peor caso” que es debido completamente a tiempo esperando para triaje.

### **Tiempo de espera (sala 2)**

Este índice es exactamente igual al anterior excepto que mide el tiempo en la segunda sala de espera, entre triaje y la fase de diagnosis y tratamiento.

El tiempo en la segunda sala de espera tiene el mismo rango que tiene el tiempo en la primera sala, pero el máximo es un “peor caso” debido al tiempo esperando para diagnosis y tratamiento.

### **Ocupación de las enfermeras**

La ocupación de una enfermera es el porcentaje del tiempo en el que hay un paciente en la sala de triaje que corresponde a esa enfermera.

El valor que produce una simulación es el promedio de todas las enfermeras que hay en ese configuración. El rango de valores que puede tomar este índice es entre el 0 % (si no hay ningún paciente que pasa admisiones) hasta el 100 % (si cada enfermera no tiene ningún momento que no está atendiendo a ningún paciente).

### **Ocupación los médicos**

La ocupación de un médico funciona igual de la de una enfermera, es el porcentaje del tiempo en el que hay un paciente un la consulta que corresponde a ese médico.

El valor de una simulación es el promedio de todos los médicos en esta configuración, el rango de valores está entre el 0 % y el 100 % con las mismas restricciones que tiene la ocupación de las enfermeras descrito en la sección previa.

### **Porcentaje de pacientes atendidos**

El porcentaje de pacientes atendidos representa la capacidad de la configuración del departamento modelado para tratar con el número de pacientes que llegan durante el tiempo modelado. Un paciente atendido es uno que ha pasado por todo el departamento. El porcentaje se calcula con respecto al número de pacientes que han entrado el departamento durante el tiempo modelado.

Este valor nunca llegará al 100% debido a que siempre hay pacientes en el departamento que todavía no han llegado a salir. Si el tiempo modelado es demasiado pequeño que no permite tiempo para ni para que un paciente pase por el departamento de urgencias, este

índice puede llegar al 0 %, pero lo normal es que es un valor entre el 0 % y el 100 % (pero ninguno de los dos).

### 6.2.3. Rangos de parámetros

Para hacer el análisis del modelo, ciertos rangos de parámetros se ha elegido. De los seis parámetros, solo los cinco que representan la configuración del personal del departamento tienen rangos, los promedios de los intervalos de llegada de los pacientes están fijos para todos los simulaciones. Sin embargo, estos intervalos son estocásticos, entonces se explica aquí como cambian durante un periodo modelado.

Los valores para cada uno de los parámetros que cambia se muestra en el Caudro 6.3.

Caudro 6.3: Parámetros y los valores que pueden coger

Parámetro	Valores	Nº valores
Número de personal de admisiones	1	1
Número de enfermeras	1, 2, 3	3
Número de médicos	1, 2, 3, 4	4
Tiempo de atención de admisiones	80, 90, 100, 110, 120	5
Tiempo de atención de triaje	200, 220, 240, 260, 280	5
Tiempo de atención de tratamiento	360, 380, 400, 420, 440	5
<b>Total</b>		<b>1500</b>

### Intervalos de llegada de los pacientes

Los intervalos de llegada de los pacientes siguen un distribución de un proceso de Poisson con un medio del proceso que cambia por hora del día modelado. Aunque el proceso y los medios no cambian entre simulaciones, el efecto de un cambio en la semilla de aleatoriedad de una ejecución del simulador cambiará los intervalos y es esta propiedad la que permite el análisis del modelo estadísticamente, usando varios valores diferentes para esta semilla.

Los promedios del proceso de Poisson tienen valores diferentes dependiendo de la hora del día. Para el análisis del simulador se han adaptado una serie de valores presentado en la literatura[15]. Los promedios de los intervalos de llegada de los pacientes se muestran en la Figura 6.1.

El valor especificado para el promedio del intervalo entre llegas se ha fijado a 10, lo cual significa que las ejecuciones simulan hasta diez pacientes por hora, el valor al medio día.

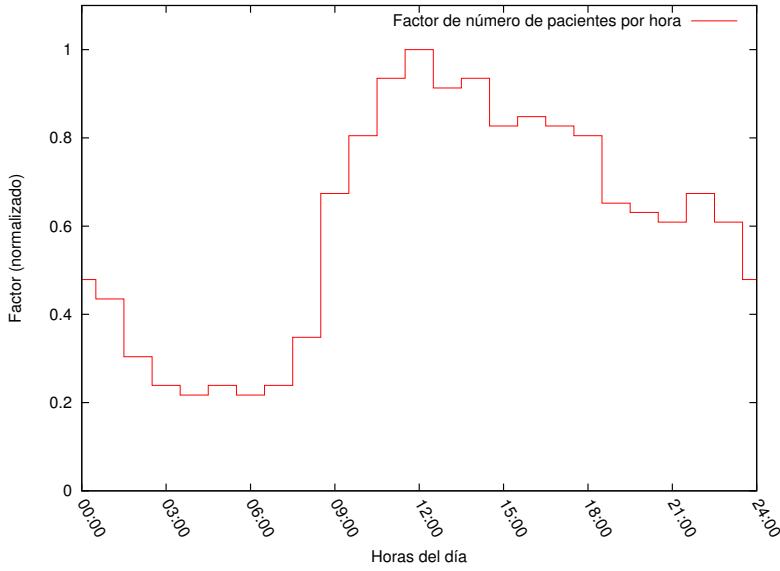


Figura 6.1: Factor del número de pacientes por hora

#### 6.2.4. Tiempo para alcanzar el régimen estacionario

El modelo empieza con el departamento modelado vacío, pero en el sistema real el departamento de urgencias está abierto 24 horas por día y por lo general nunca tiene períodos sin ningún paciente en el departamento. Entonces para simular un día entero según el modelo hace falta un periodo de tiempo para calentar el simulador antes de tomar medidas.

Dependiendo de los parámetros, la ejecución del simulador no siempre tiene un equilibrio, si el personal del departamento está saturado completamente representa una situación en la cual el estado nunca establecerá. Las simulaciones en las que la capacidad del departamento modelado es superior a la necesidad de los pacientes permitirá lograr un equilibrio en el estado de la simulación.

Una medida del estado de una simulación es la población de pacientes dentro del departamento modelado. Si ese número crece sin parar el estado de la simulación nunca se estabilizará, al contrario si llega hasta un valor y después sigue con un valor más o menos estable represente una simulación con un equilibrio. Para buscar el tiempo que tarda el modelo en calentar, se busca este punto donde la población de pacientes se estabiliza.

Se ha medido la población de pacientes en la simulación en cada tic para cuatro ejecuciones del simulador con semillas de aleatoriedad diferente como lo definido en la Sección 6.2.1. Se ha tomado el promedio de los valores de la población de las ejecuciones distintas. Se muestra los resultados de estas pruebas para una selección de conjuntos de parámetros en la Figura 6.2. Los parámetros se han elegido para representar el rango de parámetros que resultan en simulaciones con un equilibrio.

Todas las pruebas del tiempo para llegar a un estado equilibrado se llega alrededor de 800

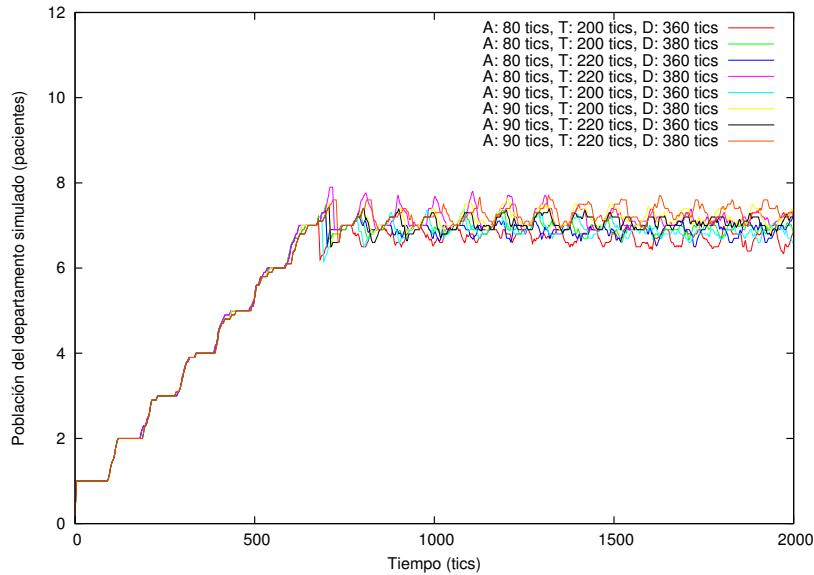


Figura 6.2: Población de pacientes estableciendo al principio de la ejecución

tics, o 80 minutos de tiempo modelado. Se ha puesto el tiempo de calentar el sistema a 900 tics para dejar un colchón para el caso de configuraciones excepcionales y también para elegir un número redondo. Que el tiempo para calentar el sistema es una hora y media es más fácil acordarse y relacionar con experiencia del sistema real que ochenta minutos.

### 6.2.5. Comportamiento con semillas diferentes

El modelo presenta un comportamiento estocástico por la tasa de llegada de los pacientes que sigue un proceso Poisson. Entonces, para asegurar que el valor de la semilla de aleatoriedad no afecta los resultados demasiado, se repite todas las pruebas un número de veces que se ha definido en la Sección 6.2.1.

El comportamiento del modelo se mide con los valores de cada uno de los índices especificados. Para cada índice se ha ejecutado el simulador con todos los 1500 conjuntos de valores del espacio de parámetros. Esto se ha repetido 4 veces con cuatro semillas de aleatoriedad diferentes.

Con los valores de cada índice de todo el espacio de parámetros se produce una histograma de la distribución de valores. Los distribuciones se compara entre las repeticiones de las ejecuciones para las diferencias. Se muestra los resultados en las Figuras 6.3 - 6.8.

La distribución del índice de tiempo de atención muestra que diferencias en la semilla de aleatoriedad solo tiene un pequeño efecto como se muestra en la Figura 6.3. Sin embargo se nota un hueco en la distribución de los escenarios lo cual representa que no hay ninguna configuración que dé tiempos de atención entre 3099 y 3636, la razón por esto se investiga en la siguiente sección.

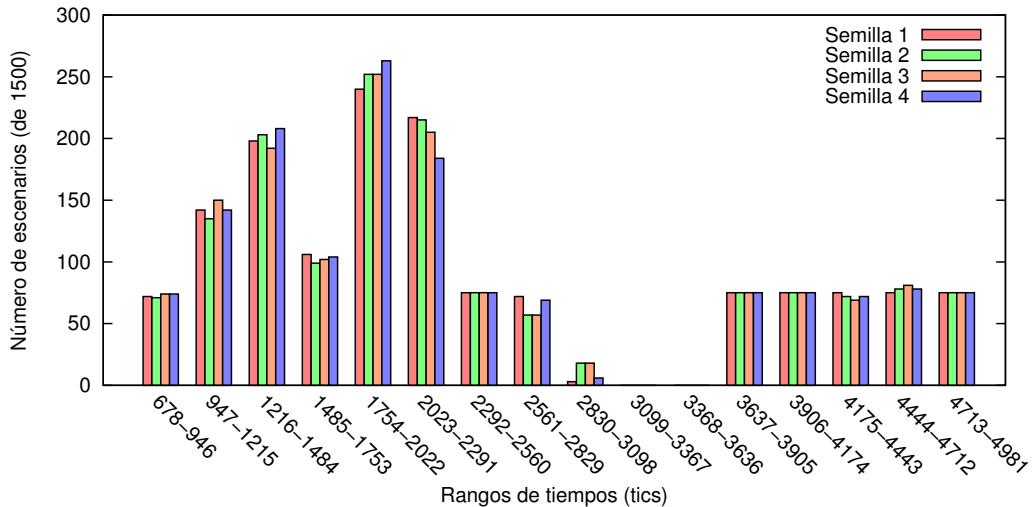


Figura 6.3: Distribución del índice de tiempo de atención por repetición

El tiempo de espera en la primera sala de espera es el tiempo que los pacientes esperan para ser atendidos en triaje lo cual se representa en la Figura 6.4, y las diferencias en la semilla de aleatoriedad tampoco tienen un gran efecto en este índice. Un gran número de los escenarios tienen un valor pequeño para el tiempo de espera antes de triaje.

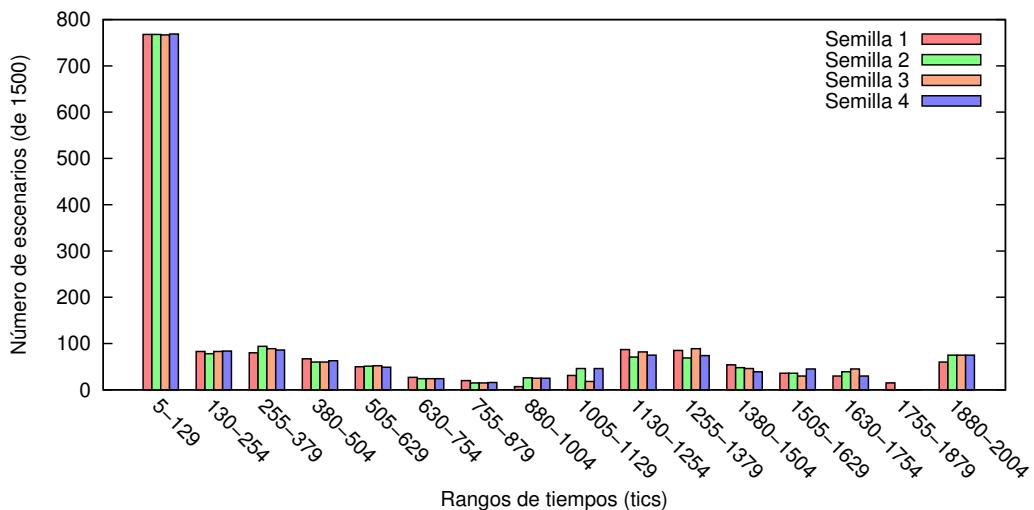


Figura 6.4: Distribución del índice de tiempo en la primera sala de espera por repetición

Después de triaje los pacientes esperan diagnosis en la segunda sala de espera, la distribución del tiempo de espera se muestra en la Figura 6.5. Al inverso del tiempo de espera antes de triaje este parámetro tiene un gran conjunto de escenarios con un tiempo de espera muy grande, pero la semilla de aleatoriedad no cambia mucho la distribución de escenarios para este índice.

Se muestra en la Figura 6.6 que la ocupación de las enfermeras es más susceptible a cambios

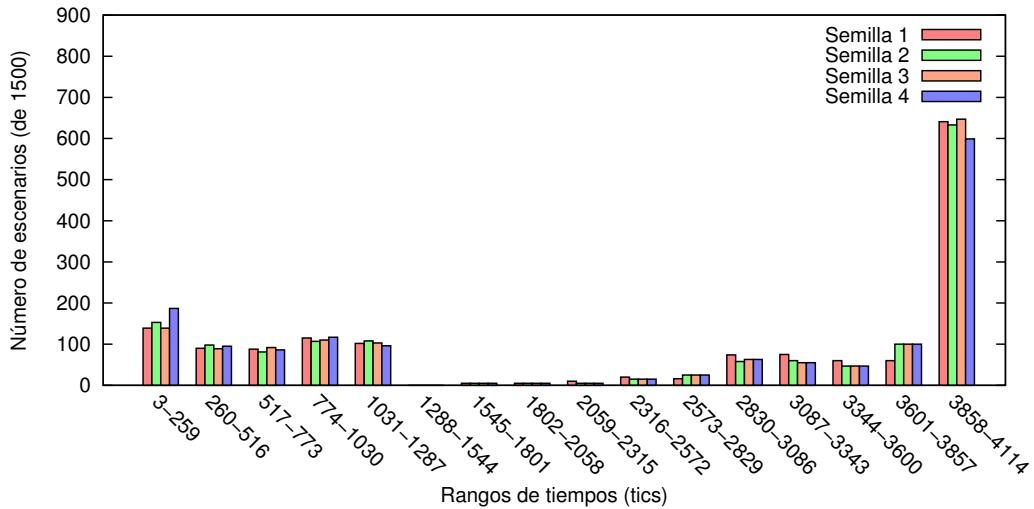


Figura 6.5: Distribución del índice de tiempo en la segunda sala de espera por repetición

pequeños en los intervalos de llegada de los pacientes que cambian con semillas de aleatoriedad diferentes. Sin embargo, la distribución sigue un patrón muy similar entre las semillas.

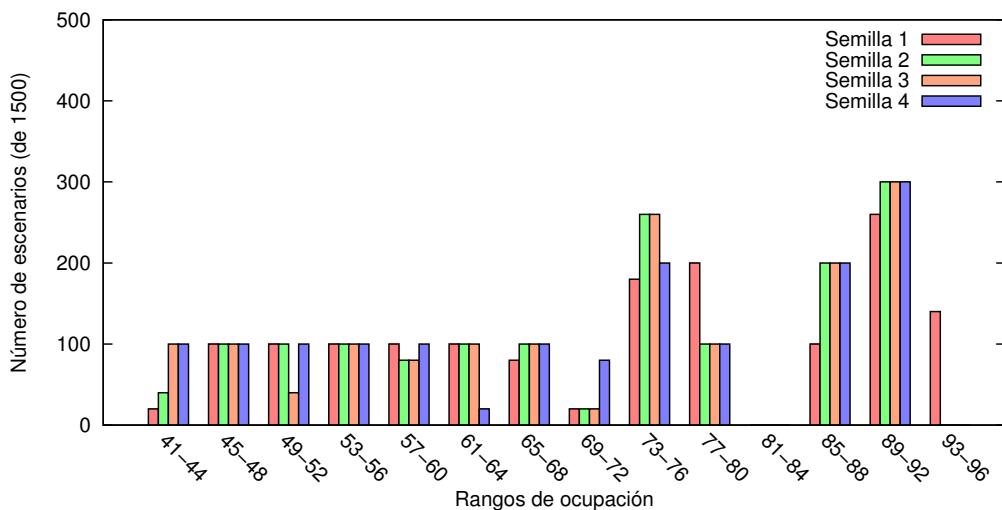


Figura 6.6: Distribución del índice de la tasa ocupación de las enfermeras por repetición

La ocupación de los médicos también tiene unos puntos que son más susceptible a matices en el patrón de llegada de los pacientes como se presenta en la Figura 6.7, pero solo cuando el índice es más grande, representando una mayor tasa de ocupación.

El número de pacientes atendidos varía un poco en función de los patrones de llegada de los pacientes que presenta cambios en su valor que se muestra en la Figura 6.8, aunque el patrón entre todos los escenarios sigue siendo muy parecido.

Los resultados que se han presentado muestran que pequeñas diferencias en los intervalos de llegada de los pacientes debido a cambios en la semilla de aleatoriedad tiene poca influencia

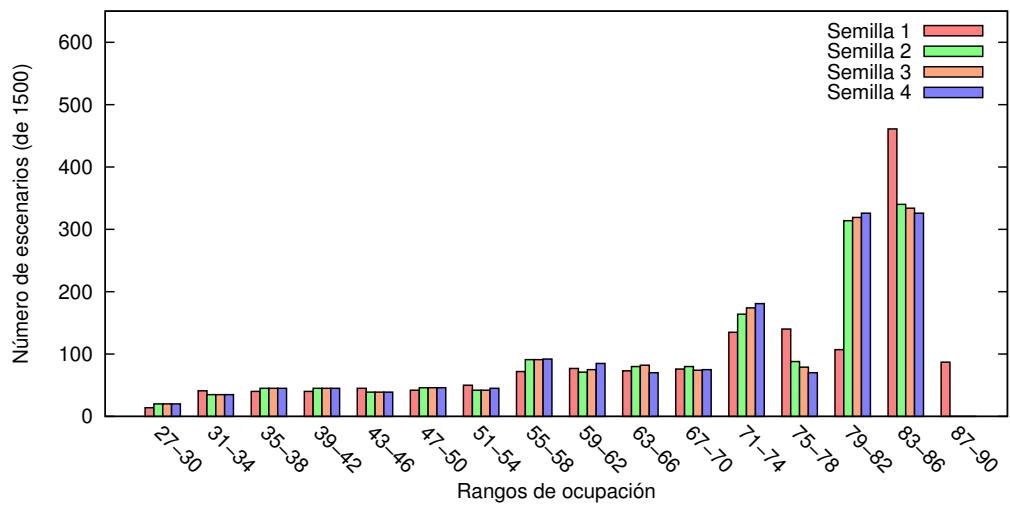


Figura 6.7: Distribución del índice de tiempo de la tasa ocupación de los médicos por repetición

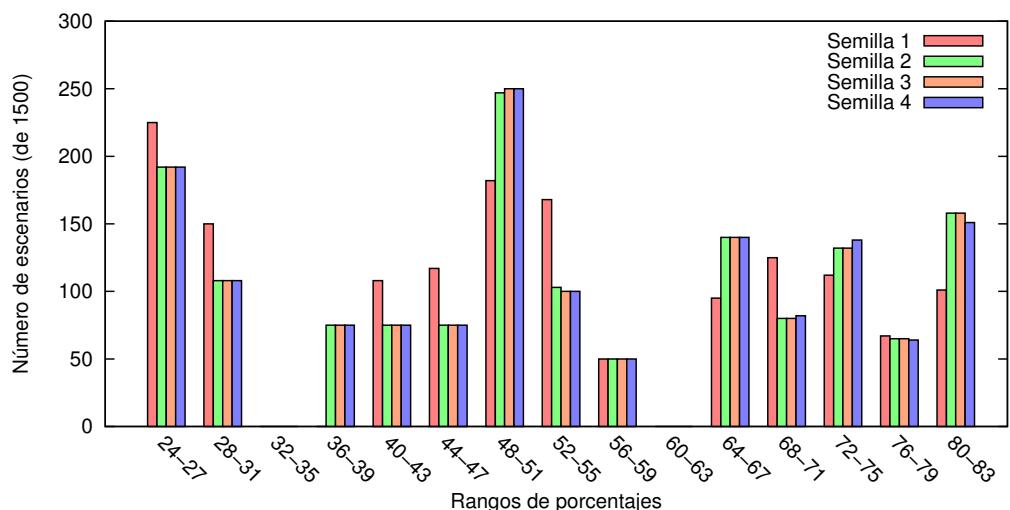


Figura 6.8: Distribución del índice de la tasa de pacientes atendidos (de los que entran) por repetición

en los índices identificados. Los índices que son más susceptibles a matices en el patrón de llegada de los pacientes son los que representan tasas de ocupación del personal del departamento y la tasa de paciente atendidos, probablemente la causa se debe a un número diferente de pacientes durante el periodo de tiempo simulado.

### 6.2.6. Sensibilidad de los parámetros

El simulador que implementa el modelo que se analiza en este capítulo se usará en el futuro como base de un sistema de ayuda a la toma de decisiones. Ese sistema se usará en múltiples departamentos, en múltiples hospitales. Antes del uso en cada local, habrá un fase de sintonización, donde el simulador se ajusta usando datos previos del sitio.

Existe la posibilidad que todos los datos necesarios no están disponibles para el proceso de sintonización, en este caso puede ser que uno o más de los parámetros no se pueda sintonizar correctamente. En el caso que la sintonización no sea completa lo más importante es saber cual será el efecto de la falta de información. Más precisamente lo que se necesita es saber que efecto tienen los cambios en ese parámetro para cada uno de los índices que se estarán mediendo.

Eso se denomina la sensibilidad del parámetro, y represente un parte importante del comportamiento del modelo. En lo que queda de esta sección se explicará como los seis índices identificados reaccionan a cambios en los cinco parámetros que describen la configuración del departamento de urgencias.

Los siguientes gráficos, las Figuras 6.9 - 6.14, muestran los promedios y los rangos de valores para cada uno de los índices identificados para cambios en un parámetro a la vez. Para cada valor de un parámetro se muestra una barra que representa el rango de los valores que puede resultar de una configuración que tiene este valor para el parámetros mostrado. El punto en la linea representa el promedio de todos los valores del índice.

Cada barra dentro del mismo gráfico muestra el mismo número de escenarios, entonces una barra más corta representa un conjunto de escenarios más densos en su distribución, o en este caso falta de distribución. Una barra más larga representa una mayor distribución entre este conjunto de escenarios.

El primer índice es el tiempo de atención a los pacientes, el promedio del tiempo que cada paciente tardó en pasar por todo el departamento de urgencias se muestra en la Figura 6.9. Se puede observar que el parámetro que tiene más efecto es el número de médicos, la Figura 6.9(d). Tener sólo un médico es la causa de que el tiempo de atención sea mayor que tres mil tics, incluso el cambio entre dos médicos y uno provoca un salto bastante grande en el tiempo de atención. Entonces es el número de médicos lo que produce el hueco en la distribución de escenarios en este índice que se ha mostrado en la sección anterior en la Figura 6.3.

El índice del tiempo de espera en la sala de espera entre admisiones y triaje que se denombra la Sala de Espera 1 se presenta en la Figura 6.10. Como es lógico, los dos parámetros que

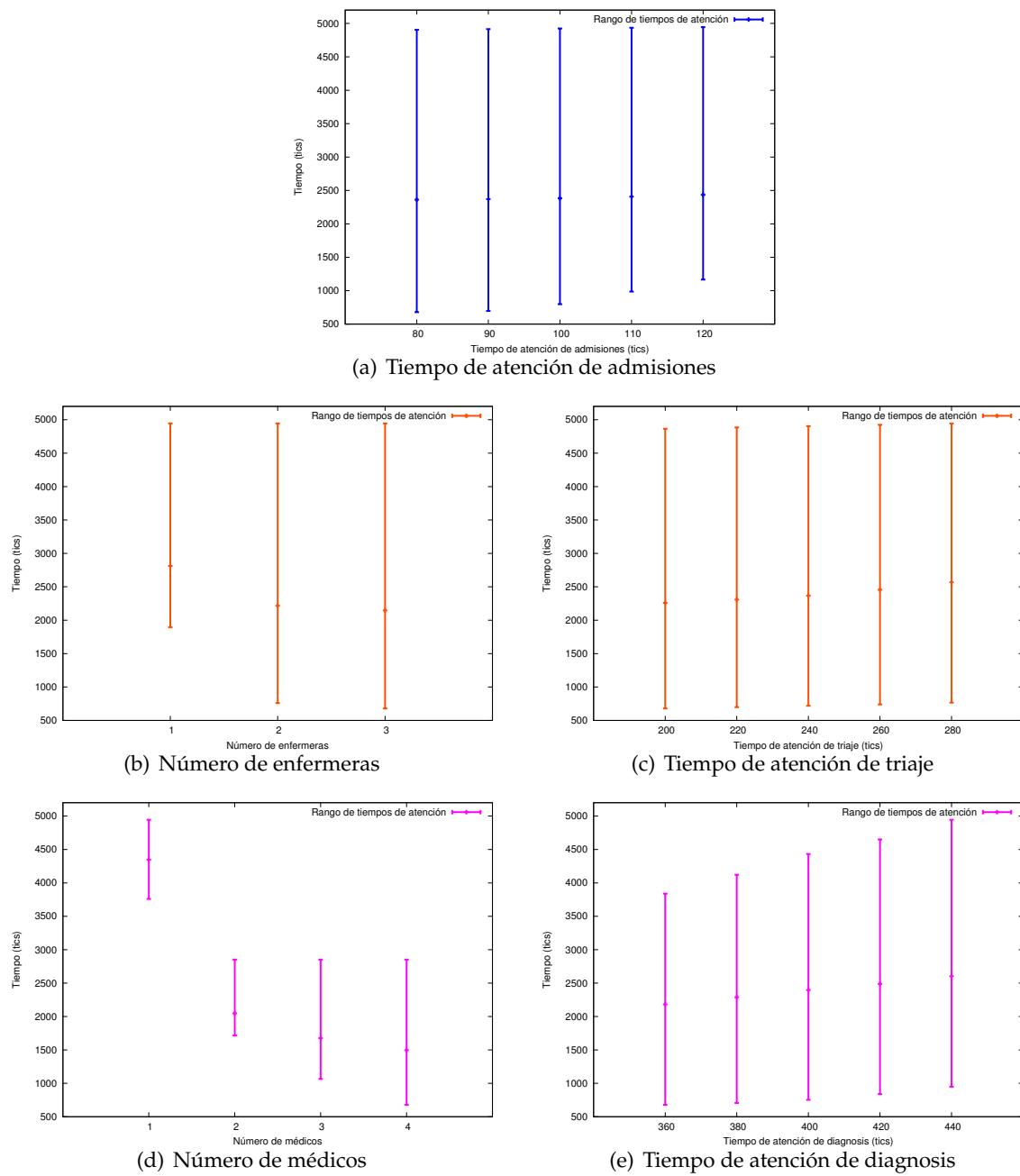


Figura 6.9: Sensibilidad a cambios en parámetros del índice de tiempo de atención

afectan más al tiempo de espera antes de triaje son el número de enfermeras, la Figura 6.10(b), y el tiempo de atención de triaje, la Figura 6.10(c). Si el número de enfermeras es suficientemente superior a la demanda, como se representa aquí con tres enfermeras, el tiempo de espera casi nunca será mayor que cero, y el tiempo de atención, aunque menos importante, aumenta el tiempo máximo de espera mientras sube el tiempo de atención de triaje.

El tiempo de atención de admisiones, la Figura 6.10(a), tiene un pequeño efecto en que valores mayores bajan el máximo tiempo de espera antes de triaje, debido a que los pacientes salen de admisiones con menor frecuencia y los pacientes estarían todavía esperando atención en admisiones.

Al igual que el tiempo de espera entre triaje y admisiones, el tiempo en el lugar denominado la Sala de Espera 2, entre triaje y diagnosis es influido más por las interacciones que lo sigue, como se muestra en la Figura 6.11. Otra vez se puede observar que el número de médicos, la Figura 6.11(d), tiene el mayor efecto, pudiendo llegar a un desastre para el servicio al paciente. El tiempo de atención de diagnosis, la Figura 6.11(e), tiene un efecto más sutil, aumenta el tiempo máximo de espera mientras sube el tiempo de atención.

El porcentaje de ocupación de las enfermeras de triaje es el índice que se presenta en la Figura 6.12, y como se espera el número de enfermeras, la Figura 6.12(b) lo afecta mucho. La adición de enfermeras reduce la ocupación considerablemente, con rangos que no se solapan. El tiempo de atención de triaje, la Figura 6.12(c), tiene el efecto de aumentar el mínimo del rango de ocupación, pero afecta menos al máximo de estos rangos.

El índice del porcentaje de ocupación de los médicos no tiene una sola variable que lo afecta tanto como en el caso las enfermeras como se muestra en la Figura 6.13. El número de médicos, la Figura 6.13(d), tiene mayor efecto y sigue el patrón que sólo un médico represente una situación grave de mucha ocupación. En este caso el tiempo de atención de diagnosis, la Figura 6.13(e) no tiene tanto efecto como la atención de triaje tenía para la ocupación de enfermeras.

El último índice que se presenta en la Figura 6.14 es el porcentaje de pacientes atendidos durante el periodo de tiempo modelado. Este índice representa donde hay cuellos de botella en el sistema. El número de médicos, la Figura 6.14(d), tiene un efecto bastante grande, otra vez un médico no es suficiente para la demanda del sistema, pero el número de enfermeras, la Figura 6.14(b), tiene mayor efecto en los escenarios donde hay sólo una enfermera que no deja el porcentaje de pacientes subir a más que 60 %.

Se puede concluir de todos aquellos gráficos, que el número de enfermeras y el número de médicos son los dos parámetros que tienen más efecto en los índices. Los tiempos de atención afectan menos a los índices y normalmente solo a los índices que están directamente relacionado con este etapa de atención. El tiempo de atención en admisiones no tiene mucho efecto sobre ninguno de los índices, en el alcance de todo el departamento simplemente no representa una parte muy crítica.

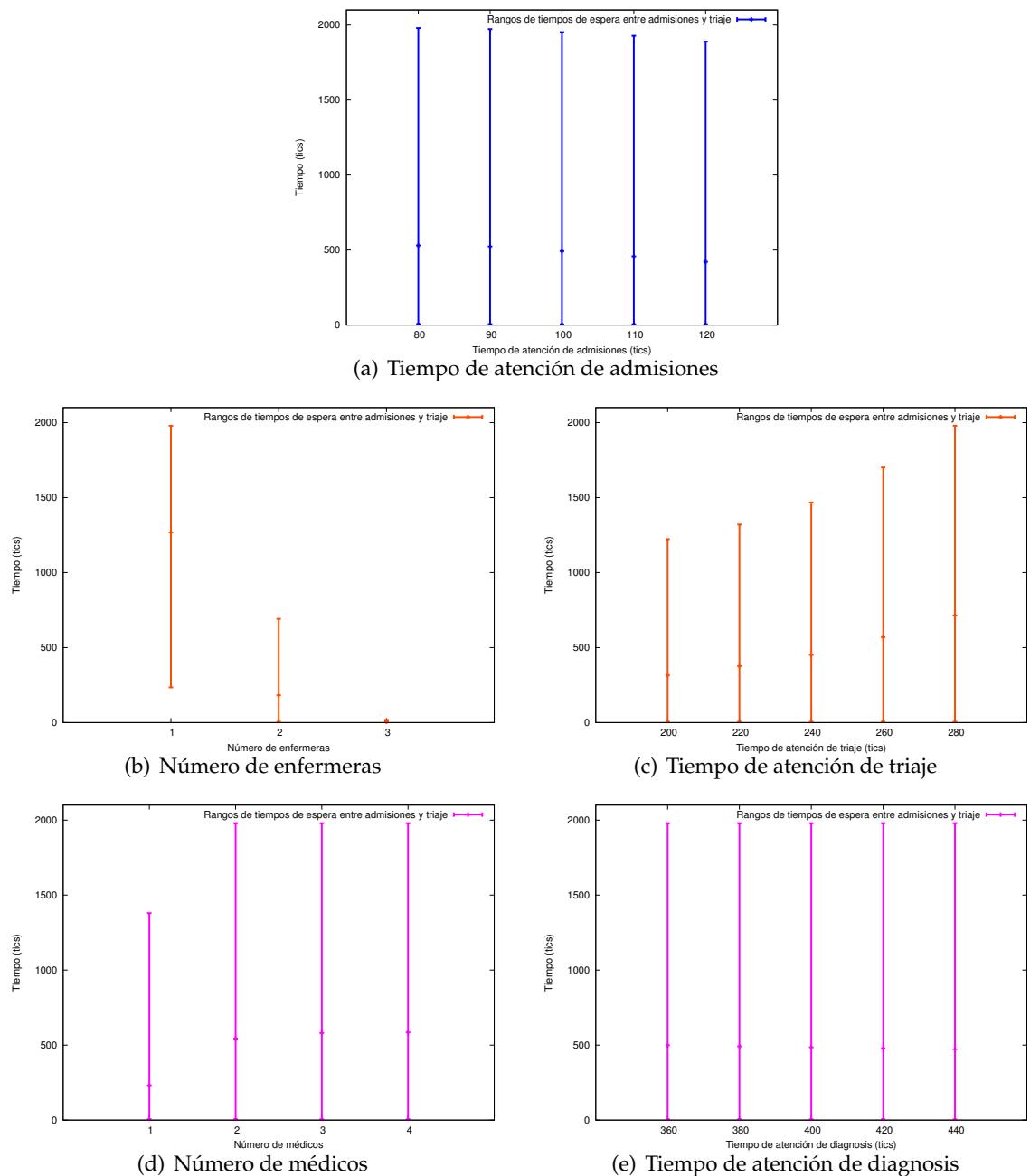


Figura 6.10: Sensibilidad a cambios en parámetros del índice de tiempo en la primera sala de espera

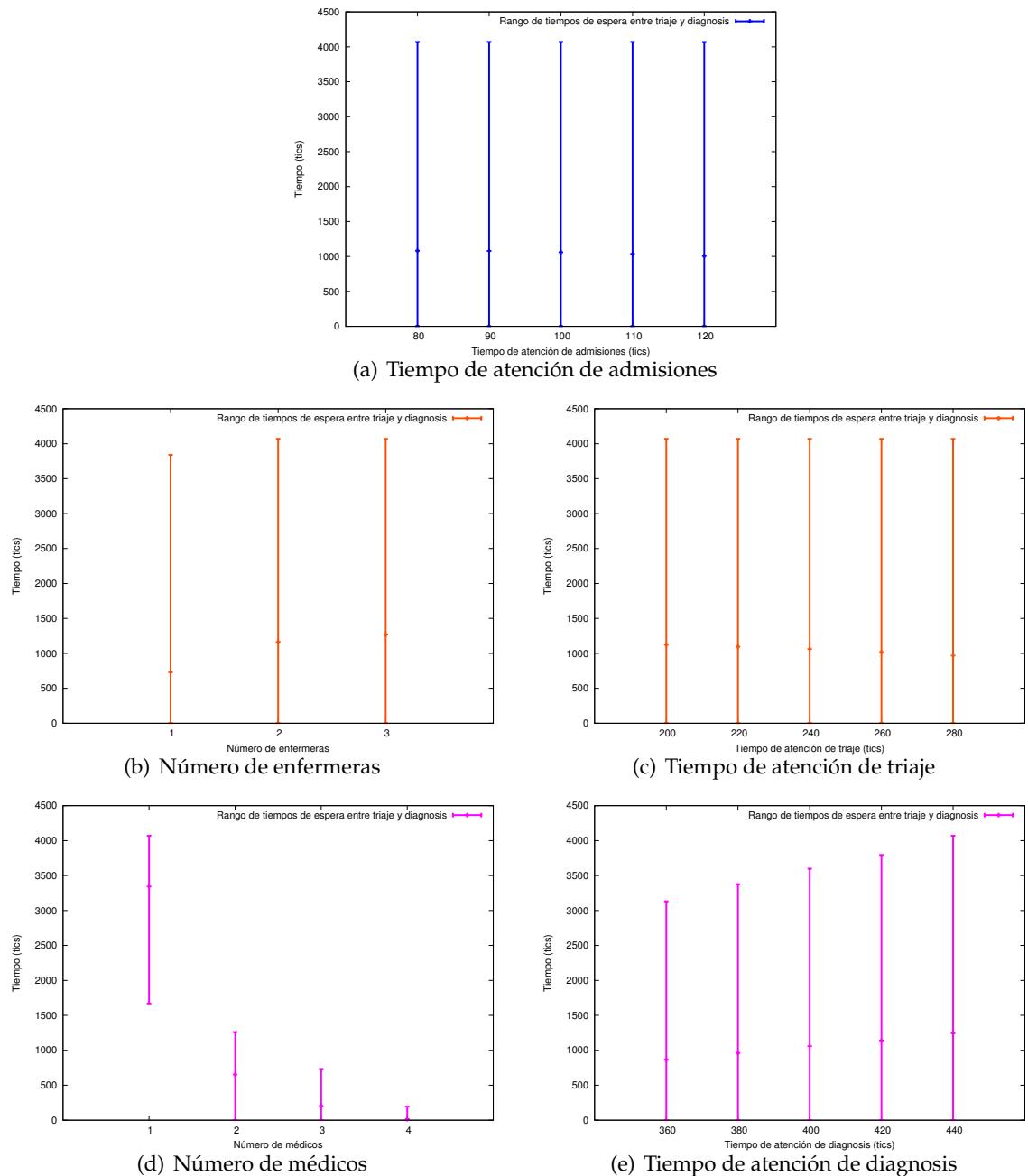


Figura 6.11: Sensibilidad a cambios en parámetros del índice de tiempo en la segunda sala de espera

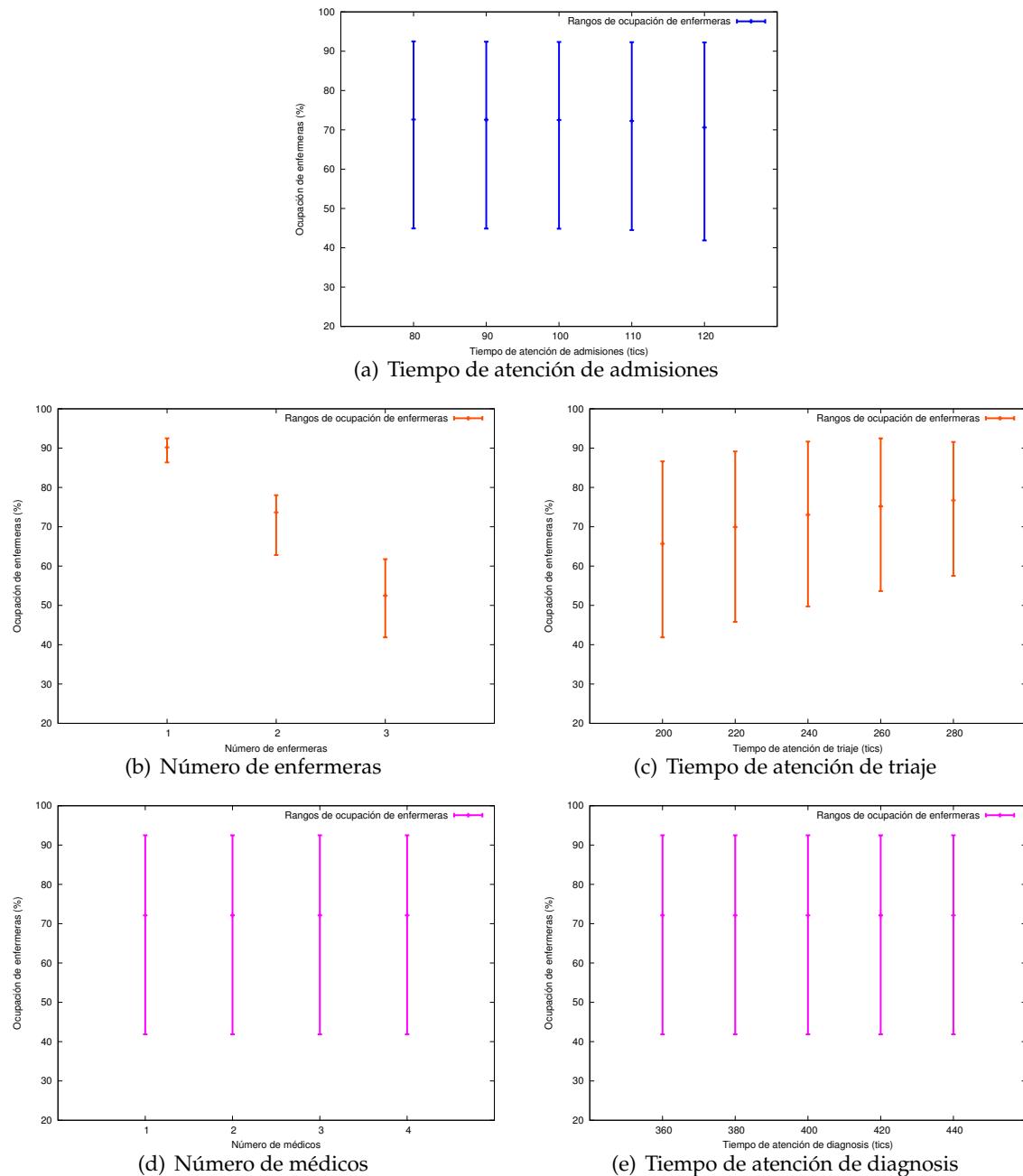


Figura 6.12: Sensibilidad a cambios en parámetros del índice de la ocupación de las enfermeras

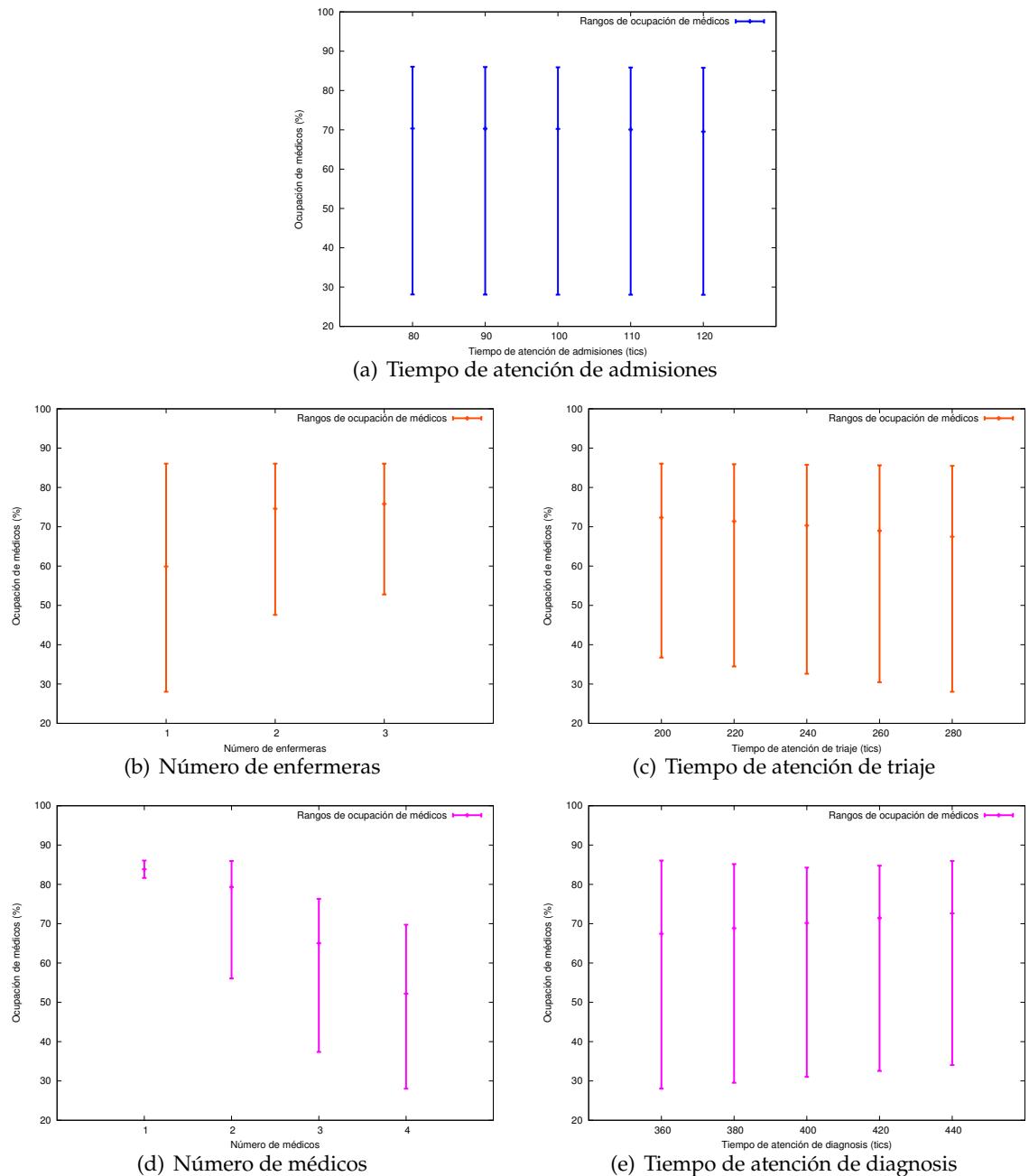


Figura 6.13: Sensibilidad a cambios en parámetros del índice de la ocupación de los médicos

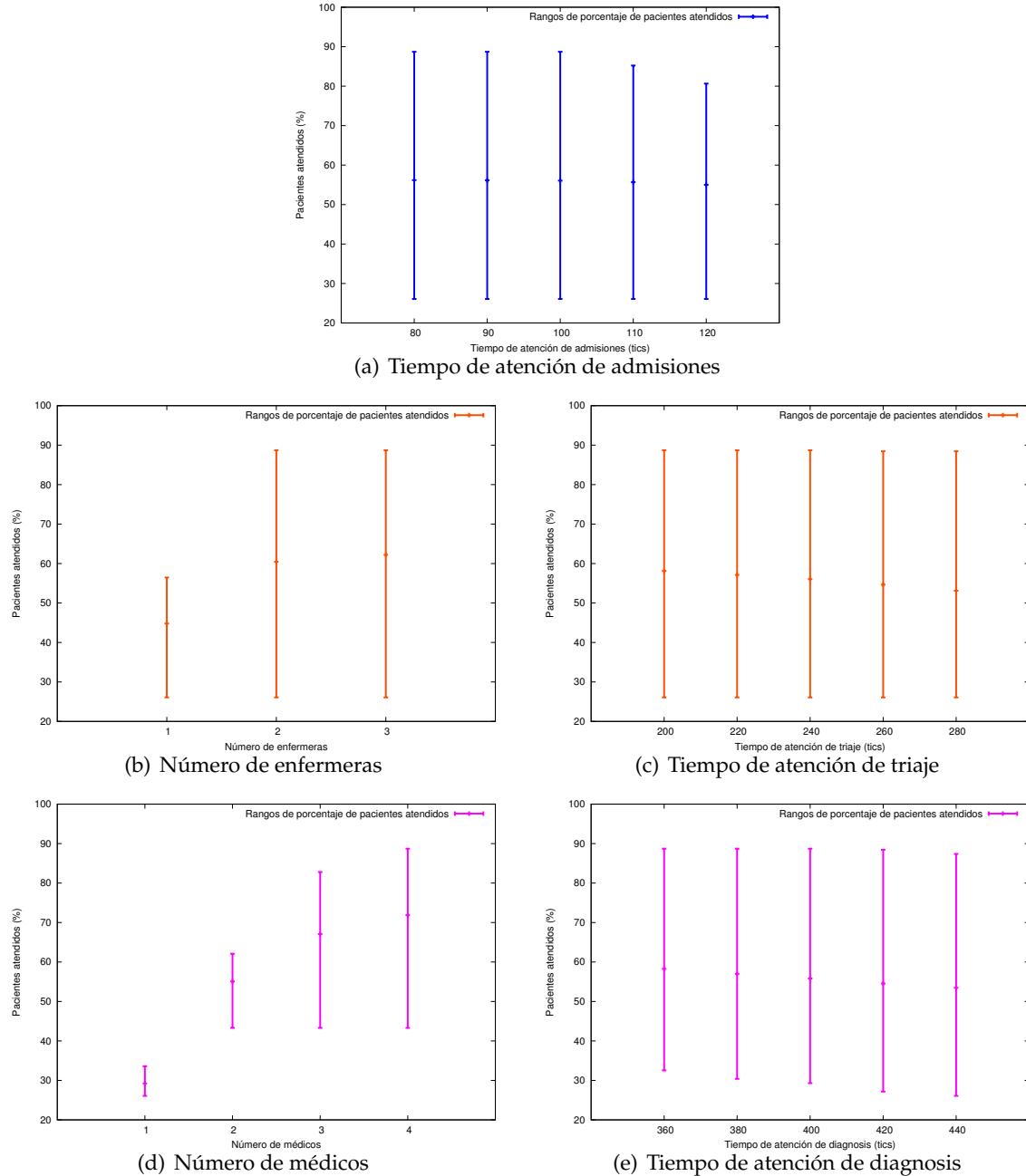


Figura 6.14: Sensibilidad a cambios en parámetros del índice del porcentaje de pacientes atendidos



# **Capítulo 7**

## **Conclusiones**

Este capítulo se dedica a resumir el trabajo realizado y presentar los aspectos importantes del los resultados obtenidos. Además se presenta la dirección futura del trabajo y las líneas abiertas a donde puede ir la investigación.

### **7.1. Conclusiones**

Las ciencias hacen un gran uso de la herramienta de simulación para resolver muchos problemas que no se puede tratar usando el sistema real por razones de coste, tiempo, o peligro. El trabajo presentado cabe dentro del ámbito de la ciencia computacional. Se refiere a la ciencia primero, para la metodología que permite estudiar un sistema real y construir un modelo de ello, específicamente en este caso un modelo basado en agentes. En segundo se usa la informática que da la máquina de simulación para implementar y medir las propiedades del modelo, también provee la computación de altas prestaciones que permite correr miles de experimentos distribuidos en tiempo razonable. Se emplea la matemática para las técnicas de análisis de datos que posibilita el estudio de los miles de ejecuciones necesarios para analizar de forma exhaustiva a el modelo.

Los departamentos de urgencias son sistemas de mucho interés en el ámbito de la mejora de procesos salud sanitarios, sin embargo tienen propiedades que restringen cuando se puede cambiar para buscar y probar mejoras. La simulación es una gran herramienta que puede ayudar en este situación, permite el estudio y análisis de un departamento de urgencias sin poner en peligro los pacientes que se tratan ahí. Sin embargo, la simulación no ha tenido el mismo éxito en el ámbito de salud en general, y en los servicios de urgencias específicamente, que en otros campos como fabricación. Faltan modelos que pueden mostrar la verificación de datos y generalidad de uso.

Se ha construido un modelo basado en agentes que representa un departamento de urgencias general. Ese modelo se ha desarrollado a través de la información recibido durante las

entrevistas mantenidas con personal de dos hospitales de Cataluña a lo largo del proceso. La primera iteración del modelo se ha presentado, que describe el comportamiento de un departamento de urgencias que se compone de cinco clases de agentes - pacientes, sus acompañantes, personal de admisiones, enfermeras, y médicos - que interactúan en cuatro lugares distintos de urgencias - admisiones, triaje, diagnosis y tratamiento, y las salas de espera.

Se ha implementado una versión del modelo de baja complejidad con la máquina de simulación NetLogo. El simulador presenta funcionalidades sencillas de usar, incluso para usuarios no informáticos, con un número de parámetros cambiados para probar el efecto de cambios en la configuración del departamento de urgencias modelado. El simulador se ha mostrado válido con respecto al modelo que implementa.

Se ha realizado un análisis del modelo a través de ejecuciones del simulador con todas las combinaciones de valores para los seis parámetros que representan la configuración del departamento de urgencias modelado. El análisis ha permitido asegurar que el modelo se comporta de manera semejante con diferentes tiempos entre llegadas generados con la misma distribución, una propiedad importante para modelar un sistema estocástico.

A través del análisis, se ha probado la sensibilidad del modelo a cambios en los valores de los parámetros que se usan para configurar las simulaciones. Cada índice identificado tiene una reacción distinta a cambios en cada uno de los seis parámetros, especialmente los tiempos en las dos salas de espera responden más a cambios en el número y tiempo de atención de los dos procesos que se limitan y menos al tercero. Sin embargo, se puede concluir que cambios únicamente en los tiempos de atención tienen muy poca influencia en los índices, por el otro lado los números del personal (de admisiones, las enfermeras, y los médicos) tienen mucha más influencia en los índices.

El modelo, en su estado actual se puede usar para modelar departamentos muy simples, pero hace falta otra iteración de desarrollo para llevar el modelo, y el simulador que lo implementa a un nivel donde realmente funcionará como el base de un sistema de ayudar a la toma de decisiones. No obstante, el modelo representa una fase importante en el camino que acabará con una herramienta de alta utilidad para la gestión de departamentos de urgencias.

## 7.2. Líneas abiertas

Los trabajos realizados representan la base de un proyecto más grande que tiene amplio uso en departamentos de urgencias de muchos partes. Como ya se ha explicado el modelo presentado tiene algunos limitaciones como su sencillez y falta de los algunos de los aspectos más complicados que existen en dichos departamentos.

El primer aspecto del modelo que necesita ser mejorado es el comportamiento dentro de los departamentos individuales. Ahora las fases de interacción no llevan toda la complejidad

que se prevé necesario para representar los matices del como actúan las personas en ellas. Una segunda fase de análisis del sistema real será necesaria para acercar el modelo general más al sistema real.

### **7.2.1. Sintonización del modelo**

Desde un modelo más exacto hay dos líneas del trabajo futuro que, aunque deberían seguir en paralelo, tienen distintos aspectos y conllevan mejoras al modelo por métodos diferentes. El primero es la sintonización del modelo a distintos departamentos de urgencias y el segundo es el proceso de la optimización del sistema real a través del modelo.

El modelo realizado representa un departamento de urgencias general, donde se han intentado buscar un medio entre las desviaciones de departamentos diferentes. Para usar el modelo para representar un sitio específico hace falta una sintonización a las variaciones propias de él. Una línea abierta a investigación es el desarrollo de un método de sintonizar el modelo a través de datos históricos de un hospital. El simulador luego se puede usar con más confianza en este local.

Ese trabajo de sintonización será una contribución importante para la generalidad del modelo.

### **7.2.2. Optimización del sistema**

La segunda parte más importante del trabajo futuro es el verdadero uso del modelo para la mejora de departamentos de urgencias. La optimización del sistema real a través del modelo es un aspecto muy útil de los futuros usos del modelo presentado.

Se podrá, mediante índices definidos por el propio departamento, buscar las configuraciones óptimas del departamento modelado. El modelo como está ahora está bastante sencillo, en el futuro el espacio de búsqueda será tan grande que necesitará aún más uso de computaciones de altas prestaciones.



# Bibliografía

- [1] H M Amman, L Tesfatsion, K L Judd, D A Kendrick, and J Rust. *Handbook of computational economics: Agent-based computational economics*. North-Holland, Elsevier, 2006.
- [2] R Axelrod. An evolutionary approach to norms. *The American Political Science Review*, 80(4):1095–1111, Jan 1986.
- [3] E Bonabeau. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(3):7280–7287, Jan 2002.
- [4] S Brailsford. Tutorial: Advances and challenges in healthcare simulation modeling. *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pages 1436 – 1448, Nov 2007.
- [5] R Brooks. A robust layered control system for a mobile robot. *Robotics and Automation, IEEE Journal of*, 2(1):14 – 23, 1986.
- [6] H Devillers, J Lobry, and F Menu. An agent-based model for predicting the prevalence of *Trypanosoma cruzi* I and II in their host and vector populations. *Journal of theoretical biology*, 255:307–315, Jan 2008.
- [7] JM Epstein. Agent-based computational models and generative social science. *Complexity*, 4(5):41–60, 1999.
- [8] JM Epstein. Learning to be thoughtless: Social norms and individual computation. *Computational Economics*, 18(1):9–24, 2001.
- [9] C Fernandes, P Tanabe, N Gilboy, and L Johnson. Five-level triage: a report from the acep/ena five-level triage task force. *Journal of Emergency Nursing*, 31(1):39–50, Jan 2005.
- [10] D Fone, S Hollinghurst, M Temple, and A Round. Systematic review of the use and value of computer simulation modelling in population health and health care delivery. *Journal of Public Health*, 25(4):325–335, Jan 2003.
- [11] N Gilbert and P Terna. How to build and use agent-based models in social science. *Mind & Society*, 1(1):57–72, 2000.

- [12] N S Glick, S Griffin, F C Johnson, T A Kitchens, D R Masys, J H Novak, A T Poliakoff, Jr. T N Pyke, P H Smith, S L Squires, and P N Williams. Technology for the national information infrastructure: Supplement to the president's fiscal year 1995 budget. <http://www.nitrd.gov/pubs/bluebooks/1995/index.html>, 1995.
- [13] J C González. Modelo orientado al individuo con lógica difusa. Master's thesis, Universitat Autònoma de Barcelona, 2008.
- [14] S E Gonzalo. Sistema nacional de salud de España 2010. <http://www.msc.es/organizacion/sns/docs/sns2010>, 2010.
- [15] L V Green, J Soares, J F Giglio, and R A Green. Using queueing theory to increase the effectiveness of emergency department provider staffing. *Academic Emergency Medicine*, 13(1):61–68, Jan 2006.
- [16] N Hoot, L LeBlanc, I Jones, and S Levin. Forecasting emergency department crowding: a discrete event simulation. *Annals of Emergency Medicine*, 52(2):116–125, Jan 2008.
- [17] S Jones and R Evans. An agent based simulation tool for scheduling emergency department physicians. *AMIA Annual Symposium Proceedings*, pages 338–342, Jan 2008.
- [18] E Kolb, J Peck, S Schoening, and T Lee. Reducing emergency department overcrowding - five patient buffer concepts in comparison. *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pages 1516 – 1525, Jan 2008.
- [19] W Liang and C Huang. Agent-based demand forecast in multi-echelon supply chain. *Decision support systems*, 42:390–407, Jan 2006.
- [20] M Litzkow and M Livny. Experience with the Condor distributed batch system. In *Proceedings of the IEEE Workshop on Experimental Distributed Systems*, Huntsville, AL, October 1990.
- [21] J Lowery. Introduction to simulation in health care. *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pages 78–84, Jan 1996.
- [22] SM Manson and T Evans. Agent-based modeling of deforestation in southern yucatán, mexico, and reforestation in the midwest united states. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(52):20678–20683, 2007.
- [23] R L Mason, R F Gunst, and J L Hess. *Statistical design and analysis of experiments: with applications to engineering and science*. John Wiley and Sons, 2003.
- [24] M Matsumoto and T Nishimura. Mersenne twister: a 623-dimensionally equidistributed uniform pseudo-random number generator. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 8(1):3–30, Jan 1998.

- [25] D Medeiros, E Swenson, and C DeFlitch. Improving patient flow in a hospital emergency department. *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pages 1526–1531, Jan 2008.
- [26] D Mostaccio. *Simulación de Altas Prestaciones para Modelos Orientados al Individuo*. PhD thesis, Universitat Autònoma de Barcelona, 2007.
- [27] S Sanchez, T Ogazon, D Ferrin, J Sepulveda, and T Ward. Emerging issues in healthcare simulation. *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, 2:1999 – 2003, Nov 2000.
- [28] R Solar, R Suppi, and E Luque. High performance individual-oriented simulation using complex models. *Procedia Computer Science*, 1:447–456, Jan 2010.
- [29] H Stainsby, M Taboada, and E Luque. Towards an agent-based simulation of hospital emergency departments. *Services Computing, 2009. SCC '09. IEEE International Conference on*, pages 536 – 539, Sep 2009.
- [30] H Stainsby, M Taboada, and E Luque. Agent-based simulation to support decision making in healthcare management planning. *Proceedings of HEALTHINF 2010*, page electronic, Nov 2010.
- [31] K Taylor and B Dangerfield. Modelling the feedback effects of reconfiguring health services. *Journal of the Operational Research Society*, 56(6):659–675, Jan 2005.
- [32] F Wagner, R Schmuki, and T Wagner. *Modeling software with finite state machines: a practical approach*. CRC Press, 2006.
- [33] S Ward. Arguments for constructively simple models. *Journal of the Operational Research Society*, 40(2):141–153, Jan 1989.
- [34] U Wilensky. Netlogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL, 1999.
- [35] A Wollaston, P Fahey, M McKay, and D Hegney. Reliability and validity of the toowoomba adult trauma triage tool: a queensland, australia study. *Accident and Emergency Nursing*, 12:230–237, Jan 2004.
- [36] R Wuerz, L Milne, and D Eitel. Reliability and validity of a new five-level triage instrument. *Academic Emergency Medicine*, 7(3):236–242, Jan 2008.
- [37] T Young, J Eatock, M Jahangirian, A Naseer, and R J Lilford. Three critical challenges for modeling and simulation in healthcare. *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*, pages 1823–1830, Oct 2009.

