



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



FACULTAD DE
INGENIERÍA
UDELAR

SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN APLICADAS A LA LOGÍSTICA HOSPITALARIA

Caso de estudio: Sala de Emergencias del Hospital de Clínicas

Clara López Boronat
Isabel Rodríguez Gorgal

Proyecto de grado presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la
República
en cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención del título de Ingeniería
de Producción.

Tutores

Pedro Piñeyro
Antonio Mauttone

Tribunal

Jimena Ferreira
Karina López

Montevideo, Uruguay
Noviembre de 2023

AGRADECIMIENTOS

Queríamos expresar en primer lugar, el agradecimiento a nuestros dos tutores Pedro Piñeyro y Antonio Mauttone, los cuales nos han acompañado a lo largo del proyecto con conocimiento, enseñanzas y experiencia en la materia. Por su interés y dedicación en este proyecto y en nuestro recorrido académico.

También, queremos agradecer al personal del Hospital de Clínicas, Dra. Irene Retamozo, Dr. José Gorrasi y al Dr. Martín Esteche, quienes nos han brindado su tiempo y explicaciones para poder relevar la información del caso de estudio. También queremos agradecer al departamento de Información del hospital, brindando bases de datos importantes para el análisis del caso. También al personal de la Sala de Emergencias quienes siempre estuvieron al servicio y con disponibilidad para el proyecto.

Agradecer profundamente a todos los profesores y profesoras que hemos tenido a lo largo de nuestra carrera universitaria, transmitido sus conocimientos y valores académicos.

Por último, un agradecimiento a nuestros familiares y amigos que han sido de incondicional apoyo durante nuestro recorrido académico.

RESUMEN

Este informe presenta el proyecto de grado de la carrera Ingeniería de Producción de sus autoras, el cual se enfoca en aplicar técnicas de simulación a eventos discretos y optimización en la Sala de Emergencias del Hospital de Clínicas de Montevideo, Uruguay.

La motivación del estudio nace de explorar cómo la simulación con optimización permite analizar cambios en la asignación de recursos que afecten los tiempos de permanencia de los usuarios de la sala de emergencias. A su vez, se desea identificar las restricciones del sistema y las configuraciones de recursos que reduzcan los tiempos de permanencia de los usuarios. Para esto se comenzó con una revisión detallada de la bibliografía de técnicas de simulación y optimización aplicadas a problemas de logística hospitalaria. Este estudio fue la base teórica de todo el proyecto, el cual permitió identificar la técnica de simulación a utilizar, Simulación a Eventos Discretos, la metodología del proyecto y el software a aplicar, entre otros aspectos.

Luego de la revisión bibliográfica, se comenzó a trabajar en conjunto con el equipo de gestión de la Sala de Emergencias del Hospital de Clínicas, para definir los objetivos del proyecto, la metodología de trabajo, el alcance y posteriormente lograr un modelo conceptual de la realidad. A partir de este modelo conceptual se generó un modelo de simulación en el software Anylogic, el cual fue sometido a pruebas para verificar su correcto funcionamiento y validar su correspondencia con la realidad. A continuación, se llevaron a cabo pruebas de experimentación con distintas combinaciones de recursos, con el objetivo de identificar las restricciones del sistema y encontrar configuraciones que mejoraran los tiempos de permanencia de los pacientes.

A partir de los resultados se generan las conclusiones del trabajo, las cuales exponen que las restricciones del sistema con la configuración actual de recursos son la Sala de Rayos X y el consultorio de Triage. Con esto, se identificaron configuraciones que mejoran los tiempos de permanencia de los pacientes, las cuales incluyen un aumento en la cantidad de consultorios de Rayos X, un aumento en la cantidad de consultorios de Triage, y una disminución en la cantidad de consultorios médicos.

En base a los resultados obtenidos, se entiende que, se cumplió con el objetivo general del proyecto, que consistía en analizar las relaciones entre la disposición y asignación de recursos en cada componente del sistema, y cómo esto repercute en el nivel de servicio brindado a los usuarios, medido en términos del tiempo de permanencia.

Palabras clave: Logística Hospitalaria, Sala de Emergencias, Simulación a Eventos Discretos, Optimización.

CONTENIDO

Agradecimientos.....	1
Resumen.....	3
1 Introducción y motivación	7
1.1 Objetivos del Proyecto.....	7
1.2 Estructura del documento	8
2 Marco teórico	9
2.1 Logística hospitalaria	9
2.2 Métodos de simulación.....	10
2.3 Simulación en problemas de logística hospitalaria	12
2.4 Optimización en simulación	12
2.5 Software para SED	13
2.6 AnyLogic.....	15
3 Caso de Estudio.....	23
3.1 Configuración actual	24
4 Metodología del Proyecto	29
4.1 Grupos de Proceso: Iniciación	29
4.2 Grupos de Proceso: Planificación	30
4.3 Grupos de Proceso: Ejecución	30
4.4 Grupo de Proceso: Seguimiento y Control.....	31
4.5 Documentos Aplicables al Proyecto (DAP).....	31
5 Descripción de la problemática y modelado	33
5.1 Resultados esperados	33
5.2 Modelado de la estructura estática y los flujos	34
5.3 Modelado de tiempos entre arribos y tiempos de actividades.....	38
6 Verificación y Validación del modelo	41
6.1 Pruebas de Verificación	41
6.2 Pruebas de sensibilidad	53
6.3 Pruebas de validación	54
6.4 Conclusiones de la Validación y Verificación	57
7 Pruebas de Experimentación	59
7.1 Resultados caso Base.....	59
7.2 Análisis de Sensibilidad.....	60

7.3	Optimización en AnyLogic.....	74
7.4	Análisis de Resultados.....	77
8	Conclusiones.....	81
	Referencias.....	85
	Anexo 1	91
	Anexo 2	115

1 INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN

La simulación es una herramienta que utiliza la computación para evaluar sistemas reales en base a modelos numéricos y estimar características reales. Su aplicación es muy amplia, abarcando áreas como el diseño de sistemas manufactureros, la logística militar, el análisis de redes de comunicaciones y el diseño de sistemas de transporte, entre otros. Su relevancia se puede apreciar en su participación en conferencias especializadas, con un reconocimiento como una técnica imprescindible para mejorar la toma de decisiones en diversas organizaciones y sistemas (Law, 2013).

En el ámbito de los servicios hospitalarios, la simulación ha demostrado ser una herramienta para evaluar cambios y detectar cuellos de botella, entre otras aplicaciones.

En este contexto, el Hospital de Clínicas se destaca como un centro hospitalario de referencia para el país, cuyo objetivo es brindar atención médica de alta calidad todos los días. Sin embargo, en los últimos años el equipo de gestión del hospital comenzó a notar demoras excesivas en las salas de esperas, lo que expone la necesidad de buscar prácticas que mejoren los tiempos de espera de los pacientes de la sala.

Este proyecto surge de distintos antecedentes, uno de los principales es el proyecto de grado titulado “Modelado y Simulación para problemas de Gestión Logística: Una aplicación a la Gestión Hospitalaria” de Ignacio Aristimuño, Valentina Larzábal y María Eugenia Silvera (Aristimuño et al., 2021). Este proyecto de la carrera Ingeniería de Producción aplicó simulación en la sala de emergencias del Hospital Pasteur. Otros antecedentes que fueron relevantes para este trabajo fueron estudios que utilizaron simulación y optimización en problemas de logística hospitalaria, destacando especialmente el caso de Tanantong et al. (2022), brindando una base tanto conceptual como metodológica para lo realizado en este proyecto.

Otra de las cuestiones que hace significativo a este proyecto, es que representa un trabajo en conjunto de la Facultad de Medicina y la Facultad de Ingeniería, uniendo conocimientos para afrontar este desafío de manera interdisciplinaria.

A través de este proyecto, se busca no solo encontrar configuraciones que mejoren los tiempos de permanencia de los pacientes, sino también aportar en la colaboración de ambas facultades, enfocadas en el beneficio directo de los usuarios del hospital.

1.1 OBJETIVOS DEL PROYECTO.

El objetivo principal de este proyecto es encontrar combinaciones de recursos para la toma de decisiones de gestión que reduzcan los tiempos de permanencia de los pacientes en la sala de emergencias del Hospital de Clínicas, mediante la aplicación de técnicas de simulación y optimización. Para lograr este objetivo, se modela la realidad y se utiliza un software especializado para realizar simulaciones en varios escenarios.

Se espera que, a través del modelado, se identifiquen las restricciones del sistema y con esa información, se logren encontrar configuraciones que disminuyan el tiempo que los pacientes aguardan para ser atendidos.

Para cumplir con el objetivo principal, se realiza un estudio de técnicas de simulación, que analiza distintas aplicaciones en hospitales, salas de emergencias y otros sistemas. Este estudio es fundamental para comprender y aplicar de manera adecuada las técnicas de simulación y optimización en la sala de emergencias del Hospital de Clínicas.

Como objetivo secundario se tiene desarrollar una herramienta que permita analizar los datos que releva día a día la Sala de Emergencias. Esta herramienta debe tomar los datos “en crudo” y poder generar distintas visualizaciones de estos. Este procesamiento de datos es necesario para la simulación ya que debe proporcionar los datos a ingresar al modelo de simulación.

1.2 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

La estructura del resto del informe es la siguiente:

1.Introducción: En la sección actual se resumen el contenido del proyecto, se presenta la motivación, se detallan los objetivos y a su vez la organización del documento.

2.Marco teórico: En esta sección se resumen los conceptos claves con respecto a la logística hospitalaria, métodos de simulación y optimización. A su vez, se hace una revisión de los paquetes de software para simulación y se detalla el software utilizado. Por último, se presenta el caso de estudio detallando el contexto de la Sala de Emergencias, datos brindados y relevados, entre otros detalles.

3.Metodología del Proyecto: Se describe la metodología aplicada para realizar el proyecto, incluyendo las etapas de este y los documentos aplicables que se utilizaron.

4.Descripción de la problemática y modelado: Se describe el flujo¹ actual relevado de la Sala de Emergencias, los resultados esperados del proyecto y por último se presenta el modelo de simulación desarrollado.

5.Verificación y Validación del modelo: Se explica el propósito de la verificación y la validación del modelo de simulación, se detallan las pruebas realizadas y los resultados obtenidos, para finalizar con la conclusión de las pruebas.

6.Pruebas de Experimentación: Una vez validado el modelo, se generan y presentan los resultados de la simulación en el software Anylogic tanto del Caso Base (configuración de recursos actual de la Sala), como los obtenidos en el análisis de sensibilidad y en la optimización.

7.Conclusiones: En esta sección se presentan las conclusiones generales y las derivadas de los resultados de la experimentación, resaltando las configuraciones que mejoran los tiempos de permanencia. A su vez se destacan las lecciones aprendidas y los trabajos futuros.

¹ Usuarios que pasan por distintas secciones según su condición, requiriendo distintos recursos, materiales (máquinas), y humanos (doctores, enfermeros)

2 MARCO TEÓRICO

En esta sección se describe el marco teórico del estudio. Los conceptos que se pasan a resumir son los relacionados con los temas de logística hospitalaria, simulación a eventos discretos y optimización. A su vez, se tiene un estudio de los mismos temas más extenso y aplicado en el Anexo 1.

2.1 LOGÍSTICA HOSPITALARIA

En primer lugar, es importante definir el concepto hospital, como al “establecimiento destinado al diagnóstico y tratamiento de enfermos, donde a menudo se practican la investigación y la docencia” (Real Academia Española, 2023). Luego, el término logística refiere al “conjunto de medios y métodos necesarios para organizar y llevar a cabo la distribución de servicios o productos en una empresa”. Por lo que, uniendo ambos conceptos, se define a la logística hospitalaria a los medios y métodos de organización para poder tener de manera organizada y generar una distribución del diagnóstico y tratamiento de enfermos.

Los sistemas logísticos eficientes son fundamentales para el correcto funcionamiento de los hospitales (Van der Ham et al., 2019). Sin embargo, es un desafío para los directores de los hospitales tomar decisiones para poder controlar y reducir costos sin comprometer la calidad de atención a los pacientes (Przywara, 2010).

La sala de emergencias es el área más crítica dentro de un hospital (Gul & Guneri, 2015), donde se atiende a pacientes con problemas de salud de diversa gravedad. Sin embargo, debido al envejecimiento de la población, la tendencia a utilizar las salas de emergencias para cuidados que no son urgentes y la falta de recursos en el sector de la salud, se genera una alta demanda de servicios en comparación con la capacidad de atención disponible (Zeinali et al., 2015). Además, la pandemia de Covid-19 ²ha impactado significativamente las salas de emergencias, ya que ha aumentado la cantidad de pacientes infectados y la demanda de atención hospitalaria (Tavakkoli-Moghaddam et al., 2022).

Cuando la capacidad de atención de una sala de emergencias se ve superada, la calidad de la atención disminuye, lo que resulta en tiempos de espera más prolongados y una mayor asignación de recursos para abordar la situación. Por lo tanto, es crucial coordinar eficientemente los suministros en el sector de la salud con el fin de reducir y eliminar desperdicios, mejorar la satisfacción de los pacientes y garantizar una buena utilización de los recursos disponibles (Privett & Gonsalvez, 2014).

Los largos tiempos de espera y la alta afluencia de pacientes en los hospitales están afectando negativamente el servicio brindado a los pacientes (Fun et al., 2022). Especialmente en las salas de operación, que representan un alto riesgo, el acceso a la cirugía en tiempos más cortos puede reducir la tasa de mortalidad y lesiones graves, así como mejorar la productividad y la capacidad en estas salas (Meara & Greenberg, 2015).

² Los coronavirus (CoV) son una gran familia de virus que causan enfermedades que van desde el resfriado común hasta enfermedades más graves. La epidemia de COVID-19 fue declarada por la OMS una [emergencia de salud pública de preocupación internacional](#) el 30 de enero de 2020. [OPS](#)

2.2 MÉTODOS DE SIMULACIÓN

La simulación es una herramienta que puede ser definida de diversas maneras, pero en general, se trata de una representación de un sistema (Robinson, 2004). Más específicamente, refiere a la construcción de un modelo abstracto que describe los aspectos del sistema real como una serie de ecuaciones, relaciones y/o sentencias lógicas dentro de programa. A su vez, permite la exploración de escenarios posibles y así poder incorporar mejoras (Facultad de Ingeniería - Universidad de la República, 2022).

La simulación puede proporcionar estimaciones de medidas de desempeño para varios sistemas. Además, los modelos de simulación suelen tener varias medidas de salida sobre las cuales se puede aplicar optimización. Puede utilizarse correctamente para clínicas de atención médica debido a que posee la complejidad de modelar tales sistemas. Al aplicar simulación con optimización, hay que tener especial cuidado en no realizar demasiadas suposiciones poco realistas sobre el proceso, ya que se obtendría una solución inválida. Por ejemplo, la optimización no se debe utilizar para estudiar detalles del día a día. Las funciones de una clínica médica como la programación de citas se pueden manejar más cómodamente utilizando únicamente simulación. Por otro lado, en los sistemas de optimización sólo se necesitan pocas ejecuciones experimentales para encontrar soluciones óptimas, pero la complejidad de modelado de simulación puede ser (Jun et al., 1999)

A continuación, se presentan algunos tipos de Simulación distintos.

2.2.1 Simulación a Eventos Discretos (SED)

La Simulación a Eventos Discretos tiene la idea general de aproximar la realidad mediante cambios instantáneos en momentos discretos. Es una técnica de Investigación de Operaciones que puede ser usada para simular el comportamiento de sistemas complejos y crear modelos que representen la realidad, con la incorporación de restricciones y entidades³ con atributos específicos. El objetivo de aplicar esta técnica es comparar el potencial de diferentes opciones estratégicas para poder identificar las más eficientes y eficaces, especialmente en las situaciones en las que no se puede llevar a cabo encuestas o experimentos requeridos en la práctica (Zhang, 2018). La SED puede simular la ejecución de un programa determinista en un entorno estocástico⁴. Las variables en este tipo de sistemas solo pueden asumir valores particulares dentro de un universo finito de posibilidades, por lo que es necesario trabajar en un entorno estocástico, es decir, que el cambio de un evento a otro tenga cierto grado de aleatoriedad (Pooch & Wall, 1992).

La simulación cuenta con parámetros de entrada a variables aleatorias, por lo que las características estocásticas del sistema que se está estudiando se ven reflejadas en muestras de variables aleatorias. Una manera de generar la aleatoriedad en ejecución de los modelos es modificar el valor Semilla, que quiere decir el valor inicial que se introduce en el programa de computación para que el algoritmo utilizado genere la serie de números aleatorios (Facultad de Ciencias Económicas y de Administración, 2011). Por otra parte, también se tienen los retrasos o “delays”, que a diferencia de los eventos, no tienen una duración predeterminada y

³ Objetos o individuos cuyas actividades modelamos

⁴ Teoría estadística de los procesos cuya evolución en el tiempo es aleatoria, tal como la secuencia de las tiradas de un dado. <https://dle.rae.es/estoc%25C3%25A1stico>

la misma depende de las condiciones del sistema. Los retrasos a menudo se miden y son salidas deseadas del modelo.

En general, en este tipo de simulación cuenta con dos tipos de eventos, los Bound event (B) y los Conditional event (C). Los B son los eventos seguros y se pueden agendar ya que la ocurrencia es predecible, los eventos C son los condicionales y ocurren si se cumplen ciertas condiciones. En un modelo de SED el tiempo avanza de forma discreta a través de una lista de eventos B y se verifican las condiciones para que ocurran los eventos C. Cuando ocurren eventos, se experimenta un cambio en el sistema, como puede ser la llegada de una persona al hospital, el comienzo de la atención de una persona en una actividad concreta o la finalización de una espera (Robinson, 2004).

Se detallan a continuación los principales conceptos de la SED, necesarios para poder entender correctamente este tipo de modelos (Facultad de Ingeniería - Universidad de la República, 2022).

Entidades: Las entidades son elementos que se mueven a través del sistema. Son los actores principales del sistema. En un flujo, pasan por una secuencia de operaciones antes de emerger al final (por ejemplo, pacientes en un hospital, automóviles en un lavadero de autos, paquetes en una instalación de clasificación, clientes en un restaurante). Pueden estar ocupadas, desocupadas o en cola. Que una entidad se encuentre ocupada implica que está ejerciendo una actividad, por ejemplo, el ser atendido por un médico. Que esté desocupada implica que no están ejerciendo y tampoco están esperando para poder hacer una actividad. Cuando está en cola es porque se encuentra dentro del tiempo durante el cual la entidad está lista para el siguiente paso, pero aún no lo ha iniciado por falta de recursos (personal, material, espacial).

Recursos: Son elementos que están en el sistema y que se pueden utilizar siguiendo sus respectivas limitaciones, con una capacidad limitada, actuando como restricciones del sistema.

Atributos: Son características que definen a las Entidades y a los Recursos. En general se mantienen constantes a lo largo de la corrida del modelo y se representan con parámetros. Por ejemplo, para el modelado de aviones que ingresan a un aeropuerto los Atributos de las entidades podrían ser capacidad de carga, autonomía de vuelo, etc. Por otro lado, los atributos para los Recursos podrían ser: mantenimiento programado, tiempo entre fallas, turnos de trabajo, etc.

Al momento de avanzar en el tiempo en una SED se tiene que garantizar que todos los eventos ocurran en el orden cronológico correcto. Se utilizan saltos en el tiempo, pero estos no necesariamente tienen que ser constantes. El momento en el que se pasa de una actividad a otra se denomina golpe de reloj (Facultad de Ingeniería - Universidad de la República, 2022). El orden se basa en la lista de eventos futuros, esta lista contiene todos los avisos de eventos que han sido programado para ocurrir en un momento futuro. Programar un evento futuro significa que, en el instante en que comienza una actividad, su duración se calcula o se extrae como una muestra de una distribución estadística; y que el evento de fin de actividad, junto con la hora del evento, se coloca en la lista de eventos futuros.

En el mundo real, la mayoría de los acontecimientos futuros no están programados, sino que simplemente suceden como llegadas aleatorias. En el modelo, tales eventos aleatorios están representados por el final de alguna actividad, que a su vez está representada por una distribución estadística (Banks et al., 2004).

Para explicar el avance del tiempo, se define al tiempo t como el valor actual del tiempo simulado. El evento asociado con el tiempo t_1 se llama el evento inminente; es decir, es el próximo evento que ocurrirá. Después de la instantánea del sistema en el momento de la simulación t ha sido actualizado, el tiempo se adelanta a t_1 , el evento inminente y se ejecuta el evento. La ejecución del evento inminente significa el salto en el tiempo y se crea una foto instantánea del sistema para el momento t_1 , basada en la instantánea del t anterior y la naturaleza del evento inminente. En el momento t_1 , se pueden generar o no nuevos eventos futuros, pero si los hay, pasarían a estar programados. Después de que se haya actualizado la nueva foto instantánea del sistema para el momento t_1 , el reloj avanza hasta la hora del nuevo evento inminente y ese evento es ejecutado. Este proceso se repite hasta que finaliza la simulación. (Banks et al., 2004).

2.3 SIMULACIÓN EN PROBLEMAS DE LOGÍSTICA HOSPITALARIA

En la actualidad, los servicios de prestación de salud son de gran importancia para la población. Las personas buscan una mejora en la calidad de vida, por lo que la demanda de hospitales se ve aumentada. Este aumento de pacientes ha provocado la sobrepoblación en dichas instituciones, por lo que muchos investigadores han propuesto varios métodos para reducir el tiempo de espera, y mejorar el sistema de salud. Una de las técnicas más extendidas es la Simulación a Eventos Discretos (Tanantong et al., 2022).

La aplicación de la simulación en problemas de logística hospitalaria y en salas de emergencia ha demostrado ser de gran importancia para mejorar el funcionamiento de estos sistemas. Al identificar los puntos críticos que requieren mejoras, es posible enfocarse en aspectos como los tiempos de estadía y los tiempos de espera de los pacientes (Yousefi et al., 2020). Los servicios de urgencias de un hospital pueden considerarse como el área más rica para realizar un modelado, debido a que tienen filas de espera más cortas que otras partes, lo que facilita la observación y análisis de sus procesos (Mohamed, 2020). La simulación surge como una herramienta analítica adecuada para ayudar a los administradores de hospitales ya que puede representar la complejidad del sistema hospitalario y la variabilidad e incertidumbre de la atención sanitaria que necesitan los pacientes (García-Vicuña & Mallor, 2021).

Durante la aplicación de SED se toma en cuenta que las variables estén en estado estacionario, es decir, que su valor esperado es uniforme durante el período de tiempo que se considera. Una simulación está en estado estacionario si todas sus colas están en estado estacionario. Dicho estado estacionario es alcanzado luego de un período de tiempo llamado “período transitorio inicial”.

La aplicación de la técnica SED ha demostrado ser una herramienta valiosa en el sector para modelar los diversos problemas de decisión dinámica. Los modelos de simulación desarrollados mediante SED permiten planificar escenarios hipotéticos para alternativas de procesos propuestas, lo que resulta en mejoras significativas en los procesos actuales, como la reducción del tiempo de producción, la mejor utilización de recursos, la reducción de costos operativos y la eliminación de cuellos de botella (Becerra et al., 2021).

2.4 OPTIMIZACIÓN EN SIMULACIÓN

Luego de generar el modelado de un sistema y obtener los resultados de la simulación numérica, a menudo es necesario analizar qué cambios mejoran el rendimiento del sistema;

esto puede llevarse a cabo a través de la optimización combinada con simulación (Allaire, 2007).

El propósito de la optimización en simulación consiste en determinar la configuración de parámetros, cumpliendo con sus respectivas restricciones, con el fin de alcanzar el valor óptimo de una función objetivo, que refleja las características del sistema a estudiar.

El proceso de optimización implica definir un conjunto de variables de decisión que pueden ser modificadas, dado que están bajo el control de quien toma las decisiones, y existen restricciones (físicas, de presupuesto, de recursos) dentro de las cuales estas variables pueden ser modificadas (Robinson, 2004).

A diferencia de la optimización matemática, en la optimización de simulación no hay un algoritmo que garantice una solución óptima (Robinson, 2004). Por lo tanto, se utilizan métodos de búsqueda heurística para dirigir la búsqueda de la mejor solución. Aunque este enfoque es efectivo, es consumidor de tiempo ya que requiere que la simulación se ejecute repetidas veces. Por lo tanto, la búsqueda debe realizarse de manera eficiente.

El uso de la optimización en simulación puede tener algunas desventajas. A pesar de ser una herramienta útil, la optimización en estos casos solo puede lidiar con una función con objetivos finitos. Además, la simulación es una simplificación de la realidad, lo que implica que los resultados obtenidos deben ser interpretados en el contexto del conocimiento más amplio sobre el mundo real. Es importante tener en cuenta que es el modelo, y no necesariamente la realidad, lo que está siendo optimizado (Robinson, 2004).

En la literatura varios autores han utilizado la combinación de simulación y optimización para abordar los sistemas de atención médica de emergencia. Existen modelos de simulación que se combinan con metamodelos (por ejemplo, métodos de superficie de respuesta, funciones de base radial) para encontrar la mejor asignación de recursos en una sala de emergencia, de manera de reducir la congestión y mejorar el flujo de pacientes. También se han utilizado software de simulación y optimización para minimizar la duración media de la estancia en un servicio de urgencias bajo la restricción de un presupuesto de personal limitado (Aboueljine et al., 2013).

2.5 SOFTWARE PARA SED

Hoy en día, los paquetes de simulación están añadiendo funciones y capacidades rápidamente debido a la creciente competencia y a las expectativas de los clientes. Sin embargo, el mercado del software de simulación sigue siendo bastante reducido. Como resultado, hay pocas empresas que los produzcan (Concannon, 2007). A continuación, se detallarán algunos de los paquetes de software de simulación más destacados en la literatura estudiada en el Anexo 1.

2.5.1 Arena

El software de simulación Arena utiliza principalmente el método de eventos discretos para realizar simulaciones, aunque también puede utilizarse para el modelado basado en agentes (Arena, 2023).

Algunas de las características del software de simulación Arena que utiliza el método de eventos discretos son:

- El software cuenta con una metodología de modelado de diagrama de flujo que incluye una biblioteca de bloques de construcción predefinidos para modelar los procesos sin necesidad de programación personalizada.
- Tiene la capacidad de definir trayectorias y rutas para los objetos dentro de la simulación.
- Permite medir el desempeño del sistema a través de diferentes métricas.
- Ofrece la posibilidad de visualizar los resultados a través de animaciones en 2D y 3D.

2.5.2 Simul8

Simul8 es un software de simulación en el que se puede generar una maqueta visual de un proceso, similar a la creación de un diagrama de flujo. Al agregar tiempos y reglas en torno a las tareas, los recursos y las restricciones que conforman su sistema, la simulación puede representar con precisión su proceso real (Simul8, 2023).

En Simul8, se tiene la opción de elegir cuál método de simulación se adecúa más al proceso que se quiere modelar, cuenta con simulación a eventos discretos, simulación basada en agentes, simulación continua y simulación híbrida en donde se combinan las técnicas anteriores.

Las características del software Simul8 son:

- Interfaz de modelado de arrastrar y soltar.
- Bloques de construcción inteligentes, sin necesidad de codificación.
- Componentes reutilizables, guardando y agregando los flujos de trabajo, los equipos y los recursos que usa con más frecuencia en cualquier simulación.
- Conexiones de datos rápidas, en donde se vinculan las simulaciones a herramientas de productividad como ser archivos de hojas de cálculo, de texto, bases dinámicas con SQL, entre otros.
- Capacidad de animación 2D.

2.5.3 FlexSim

FlexSim posee herramientas para poder realizar simulaciones a eventos discretos, además cuenta con la opción de agregar gráficos 3D inmersivos y realistas.

La Biblioteca de Objetos Standard contiene una variedad de objetos que pueden ser usados para construir modelos de manera inmediata.

Una amplia gama de listas y propiedades preprogramadas permiten personalizar rápidamente objetos individuales, y propiedades del sistema. FlexSim posee un lenguaje de programación, FlexScript, que es similar a C, y es la salida para cientos de comandos de modelado que permiten escribir expresiones simples (FlexSim, 2023).

2.5.4 GoldSim

GoldSim es un software de simulación que permite modelar dinámicamente sistemas complejos en ingeniería, ciencia y negocios (GoldSim, 2023).

Características de GoldSim

- Interfaz de modelado de arrastrar y soltar.
- Usar la simulación de Monte Carlo para producir predicciones probabilísticas de performance de un sistema.
- Simulador híbrido, permite usar más de un tipo de simulación a la vez.

2.5.5 Simio

Otro software es Simio, el cual sirve para simular, modelar y realizar animaciones 3D utilizando SED. Es un simulador del tipo mixto ya que combina objetos y procedimientos. Es recomendado para realizar análisis en sistemas de colas (Simio, 2023).

Características de Simio:

- Cuenta con bibliotecas personalizables.
- Capacidad de programación, permite analizar riesgos y tomar opciones para prevenirlo.
- Representaciones en 3D.

2.5.6 ProModel

ProModel es un software que permite simular mediante animaciones y también cuenta con una herramienta para optimizar. Dicho software no requiere programación, por lo que se pueden crear los modelos de manera rápida y sencilla (ProModel, 2023)

Características de ProModel

- Optimización integrada.
- Representaciones en 3D.
- No requiere programación.

2.6 ANYLOGIC

Anylogic es una herramienta de análisis de sistemas complejos, que admite el modelado de dinámica de sistemas y eventos discretos basado en agentes. Mediante la combinación de estas diferentes técnicas de modelado, los investigadores pueden usar AnyLogic para caracterizar la complejidad y sistemas técnicos y sociales a cualquier nivel deseado de detalle. Su capacidad de desarrollo secundario compatible con el lenguaje Java hace factible mejorar las características predeterminadas y construir modelos más sofisticados (Hu, 2017).

El software que se elige para realizar este proyecto es Anylogic. Esto es debido a que cuenta con el método SED, método que se utiliza en este estudio. Otro aspecto para considerar es que se cuenta con el antecedente de otro proyecto de grado en el cual se aplica la SED en salas de emergencia en hospitales (Aristimuño, et al., 2021). y aplican este tipo de Software. También se tiene en cuenta que Anylogic ofrece una licencia gratuita, llamada Personal Learning Edition⁵, la cual permite realizar el modelado con casi todas las funcionalidades del software.

En el software de simulación AnyLogic, se pueden utilizar varios lenguajes de modelado visual: diagramas de flujo de procesos, diagramas de estado, diagramas de acción y diagramas de flujo y existencias. Permite agregar un diseño en 3D, permitiendo visualizar el proceso y presentarlo de una manera más amigable a las partes interesadas del proyecto. El software cuenta con varios métodos de simulación, basada en agentes, en sistemas dinámicos y simulación a eventos discretos. Su versión gratuita permite la creación de hasta 50 mil agentes, lo cual es adecuado para la simulación de un mes en el hospital en donde se generan aproximadamente 4.5 mil agentes. A su vez, Anylogic permite utilizar sus experimentos de optimización, lo cual brinda la mejor situación según el rango de parámetros determinados

⁵ Existen distintos tipos de licencia Anylogic según el uso que se le quiera dar. Ver el sitio <https://www.anylogic.com/downloads/>

(Anylogic, 2023). Además, el uso del software en un proyecto anterior de fin de carrera brinda la confianza de que el modelado se adecúa a las necesidades y nivel que este proyecto abarca (Aristimuño, et al., 2021).

En esta sección se desglosan conceptos básicos utilizados en AnyLogic, lo cual facilitará la lectura de las siguientes secciones.

Para empezar, se define el concepto de Modelo, es una descripción de un problema definido en los términos del lenguaje de modelado AnyLogic. Cada modelo se crea individualmente y representa un conjunto de agentes, que representan objetos del mundo real y experimentos, que definen las opciones de lanzamiento del modelo. Los agentes pueden representar diversos grupos, como personas, vehículos, cosas no materiales, organizaciones, entre muchas otras cosas. Los agentes son los componentes principales del modelo AnyLogic. El agente es una unidad de diseño de modelos que puede tener comportamiento, memoria (historia), tiempo, contactos, etc.

Para obtener un valor aleatorio AnyLogic viene con un gran conjunto de distribuciones de probabilidad. Todas las clases de distribución de AnyLogic se implementan sobre la base del generador estándar de números aleatorios Java (`java.util.Random`). El generador de números aleatorios (GNA) predeterminado es una instancia de la clase Java `Random`, que es un generador lineal congruente (LCG⁶).

La inicialización del GNA predeterminado ocurre durante la inicialización del experimento y luego antes de cada ejecución de simulación. El GNA utiliza una semilla, que es un número que inicializa la selección de números; dado el mismo número semilla, un GNA generará la misma serie de números aleatorios cada vez que se ejecute una simulación. Al especificar el valor inicial fijo, inicializa el GNA del modelo con el mismo valor para cada ejecución del modelo, por lo que las ejecuciones del modelo son reproducibles.

2.6.1 Interfaz

Sobre la interfaz de Anylogic se suelen tener cuatro ventanas. Una de ellas es el editor gráfico, en donde se pueden editar los diagramas y experimentos. También se encuentra la vista Proyectos, que provee acceso a los modelos de Anylogic que se encuentran abiertos, permitiendo una fácil navegación. Luego tenemos la vista Pallette, en donde se provee una lista de los ítems a utilizar en un modelo agrupados (ver Figura 2-1). Por último, se cuenta con la vista de Propiedades donde se puede ver y modificar las propiedades de los ítems del modelo.

En el editor gráfico no se cuenta con bordes, se cuenta con un lienzo infinito en el que se puede realizar los diagramas, cualquiera sea su tamaño. Este editor gráfico contiene coordenadas, las cuales son útiles para poder implementar diagramas. En la Figura 2-2 se puede ver la vista de Proyectos, en donde se muestra como los modelos están organizados jerárquicamente, se muestran en una estructura de árbol: el modelo en sí forma el nivel superior, los tipos de agentes, los experimentos, la base de datos del modelo y los recursos de archivo son los elementos del siguiente nivel (AnyLogic, 2023).

⁶ LCG es un algoritmo que permite obtener una secuencia de números pseudoaleatorios calculados con una función lineal definida a trozos discontinua

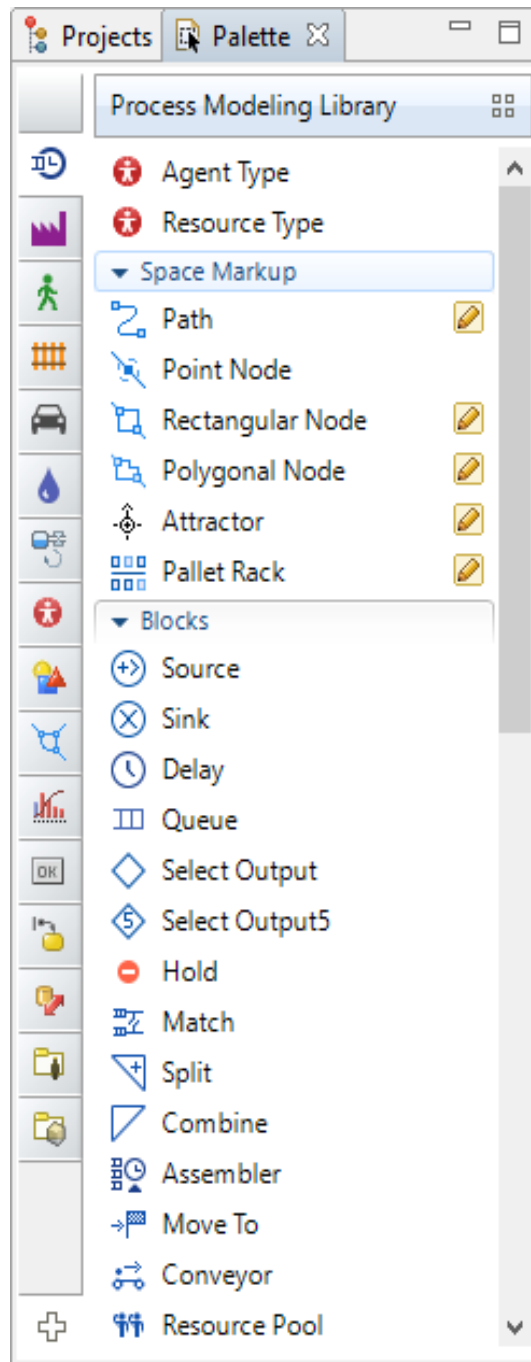


Figura 2-1: Vista Palette

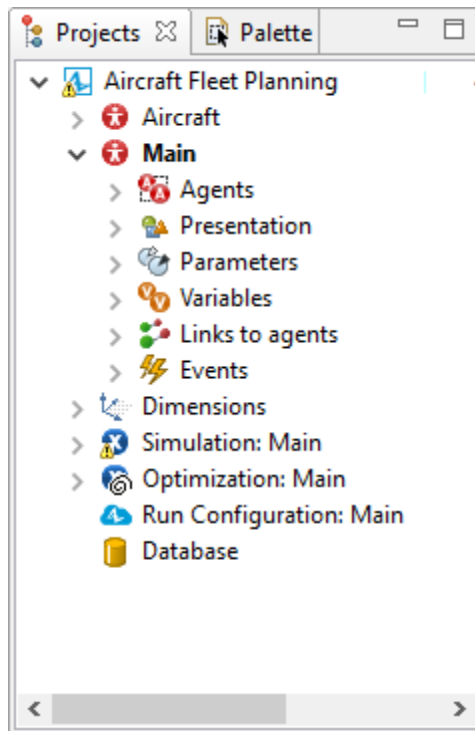


Figura 2-2: Vista Proyectos

Un modelo puede ser tanto estocástico como determinista. Hay muchas maneras diferentes de incorporar el no determinismo en un modelo. Por ejemplo, puede asignar un valor de tiempo generado aleatoriamente a una operación de transición, tasa de evento o retraso.

Dentro del software, el evento es la forma más sencilla de programar alguna acción en el modelo. Por lo tanto, los eventos se usan comúnmente para modelar retrasos y tiempos de espera. Si bien el uso de eventos es bastante claro, a veces es posible que se deba definir un comportamiento más sofisticado que no se puede definir en base a ellos. Esto se puede mitigar utilizando Bloques. Los Bloques son la construcción más avanzada para describir el comportamiento impulsado por eventos y tiempo en AnyLogic.

Si AnyLogic está ejecutando un modelo puramente discreto, el tiempo es esencialmente una secuencia de eventos y el motor simplemente salta de un evento a otro. Si se programan varios eventos para que ocurran al mismo tiempo se serializan, es decir, se ejecutan uno tras otro en algún orden interno. Si el orden es importante, se debe indicar al desarrollar el modelo para que los resultados de la simulación no dependan de la implementación.

Dentro del editor gráfico para permitir simular los flujos de eventos se unen varios bloques, permitiendo que las acciones se realicen en el sentido marcado.

También se puede realizar el modelado físico, es decir el LayOut⁷. Dentro de este LayOut se tiene nodos y rutas, los cuales son elementos que definen ubicaciones y caminos de los agentes en el espacio. El nodo define un lugar donde los agentes pueden residir. La Ruta define gráficamente una serie de movimientos para los agentes. Los nodos se pueden conectar con caminos y en conjunto, componen una red.

⁷ La palabra layout sirve para hacer referencia a la manera en que están distribuidos los elementos y las formas dentro de un diseño. <https://www.significados.com/layout/>

2.6.2 Bloques

La interfaz de AnyLogic funciona mediante la incorporación de bloques en el editor gráfico. A través de la conexión de estos bloques, se puede inducir el flujo de los agentes o entidades en general. A continuación, se tiene una explicación del significado y funcionamiento de los utilizados en este proyecto (Anylogic, 2023).

- **Bloque Source:**
Este bloque genera agentes, las llegadas pueden ser indicadas mediante una Tasa, Tiempo entre llegadas, Tabla de llegada en base de datos, Horario de tasas, Horario de llegadas o llamar una función (ver Figura 2-3).



Figura 2-3: Bloque Source

- **Bloque Sink:**
Se deshace de agentes, es usualmente el último punto en un modelo de procesos (ver Figura 2-4).



Figura 2-4: Bloque Sink

- **Bloque Queue:**
Con este bloque se puede generar una cola de agentes que esperan ser atendidos. Se puede asociar un tiempo máximo de espera para un agente. El sistema de colas puede ser FIFO, LIFO o basado en prioridades (ver Figura 2-5).



Figura 2-5: Bloque Queue

- **Bloque Select Output:**
Este bloque sirve para realizar bifurcaciones en el proceso, también se encuentra su versión en donde el flujo se separa en distintos caminos posibles. Las condiciones de separación pueden ser asignadas mediante probabilidad o por condiciones booleanas (ver Figura 2-6).

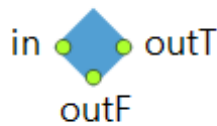


Figura 2-6: Bloque Select Output

- **Bloque MoveTo:**
Mueve al agente a una nueva ubicación. Si se adjuntan recursos al agente, se moverán con él (ver Figura 2-7).



Figura 2-7: Bloque MoveTo

- **Bloque ResourcePool:**
Define cantidades de recursos que los agentes pueden capturar y liberar. Los recursos pueden ser del tipo estático, los cuales están vinculados a una ubicación particular, móviles, en donde se puede mover por uno mismo, o portables, en donde el recurso se puede mover por agentes o por recursos móviles (ver Figura 2-8).



Figura 2-8: Bloque ResourcePool

- **Bloque Seize:**
Captura un número de recursos provistos por una ResourcePool (ver Figura 2-9). Seize incorpora un bloque de cola donde los agentes esperan los recursos. El recurso se solicita para el primer agente de la cola y, hasta que no se concede (o ese agente abandona el bloque por otro motivo), la solicitud del siguiente agente no se envía. Las opciones de destino son:
 - Agent: En donde los recursos son enviados a la ubicación actual del agente.
 - Network node: los recursos se envían al nodo de red especificado.
 - Attractor: los recursos se envían al atractor especificado.
 - Other seized resource unit: los recursos se envían a la ubicación actual de otro recurso incautado.
 - Home of seized resource unit: los recursos se envían a la ubicación de origen de la unidad de recursos incautada.
 - (x, y, z): los recursos se envían a las coordenadas especificadas.

outPreempted outTimeout

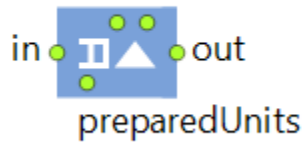


Figura 2-9: Bloque Seize

- **Bloque Release:**
Libera un número determinado de unidades de recursos previamente confiscadas por el bloque Seize (ver Figura 2-10). Los recursos en movimiento pueden regresar a la ubicación de origen (si no son captados inmediatamente por otro agente), o permanecer donde están después de ser liberados (esta configuración se configura con el parámetro Recursos en movimiento).



Figura 2-10: Bloque Release

- **Bloque Delay:**
Retrasa a los agentes durante un período de tiempo determinado. Se puede demorar un tiempo especificado, utilizar distribuciones probabilísticas o hasta que se llama al agente a ser liberado (ver Figura 2-11).



Figura 2-11: Bloque Delay

- **Bloque Time Measure:**
Tanto TimeMeasureStart como TimeMeasureEnd componen un par de bloques que miden el tiempo que los agentes pasan entre ellos, como "tiempo en el sistema", "duración de la estadía", etc (ver Figura 2-12).



Figura 2-12: Bloque TimeMeasure

3 CASO DE ESTUDIO

El Hospital de Clínicas (HC) es un hospital universitario que forma parte de la Facultad de Medicina (FMed) de la Universidad de la República (UdelaR), en Uruguay. En este hospital, al ser universitario, estudiantes de carreras de grado y posgrado de Medicina realizan prácticas en sus salas. También cuenta con la particularidad de que los médicos del personal son profesores universitarios de la UdelaR.

El HC forma parte de la Red de Servicios de Salud y atiende a diversos grupos de pacientes. Entre ellos, se encuentran la población beneficiaria de la Administración de los Servicios de Salud del Estado (ASSE), los funcionarios de la UdelaR que eligen recibir atención en el hospital, la población uruguaya que opta por los servicios de ASSE y recibe atención en el hospital, así como aquellos cuyo servicio de salud incluye cobertura en el Hospital de Clínicas. Además, cualquier persona tiene la opción de recibir atención individual abonando las consultas que realice en el hospital (HC, 2023).

La misión del HC es “Brindar atención a la salud de las personas, de calidad, con profundo respeto y compromiso hacia ellas; a través de la cual, el Hospital deviene ámbito formador de recursos humanos y de generación de conocimientos, contribuyendo al desarrollo del nivel de salud de la población, optimizando la utilización de los recursos que a tales fines le son confiados” (HC, 2023).

En 1887 y 1889, Pedro Visca, decano en ejercicio de la FMed y el Dr. Elías Regules impulsaron la idea de tener un hospital de clínicas universitario. Fue recién en 1910 que el Dr. Manuel Quintela tomó la iniciativa de realizarlo. Es el 14 de octubre de 1926 cuando se aprobó la Ley de creación del Hospital de Clínicas. Pero recién en 1953 fue que el hospital empezó a atender a sus pacientes. El Hospital se encuentra ahora bajo la dirección de la FMed, y se requiere una gestión cuidadosa de los recursos disponibles, tanto en términos de materiales, personal e infraestructura.

Actualmente, el director del HC es Álvaro Villar, elegido por la Asamblea del Claustro de la Facultad de Medicina en diciembre de 2020. En el proyecto que utilizó al postularse propuso la digitalización para el registro del trabajo de almacenes y farmacias (Muñoz, 2020).

En este contexto, una de las áreas que requiere más atención dentro del hospital es la Sala de Emergencias. Dado que el Hospital es un centro de referencia para el país y también una institución universitaria, la sala de emergencias cumple una función fundamental al brindar atención inmediata a los pacientes y, a la vez, proporcionar un espacio de práctica para los futuros médicos.

Los encargados de la gestión de la sala expresan su preocupación respecto a las demoras en pacientes de menor gravedad, pero por el momento, no se cuenta con datos concretos más que la percepción. Esta falta de información computarizada dificulta el hecho de tomar decisiones basadas en datos y a su vez, la identificación de áreas de mejora de forma no manual.

En base a estos hechos, se entiende que un estudio de simulación y optimización da el espacio a poder recabar datos específicos, estudiar los tiempos de atención, identificar los cuellos de botella que existan en el sistema y encontrar configuraciones que disminuyan los tiempos de espera de los usuarios de la sala.

3.1 CONFIGURACIÓN ACTUAL

El organigrama del HC se puede visualizar en la Figura 3-1. El Consejo Directivo Central de la UdelaR es el órgano supremo. Luego, se encuentra el Consejo de Facultad de Medicina, el cual tiene la potestad de elegir al director del HC.

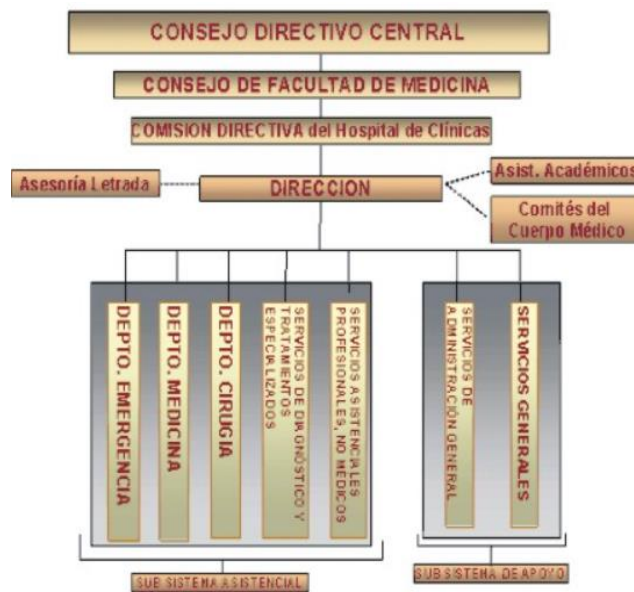


Figura 3-1: Organigrama organizacional del Hospital de Clínicas, (Hospital de Clínicas, 2023)

Algunos de los servicios clínicos brindados por el HC son los que se aprecian en la Figura 3-2.

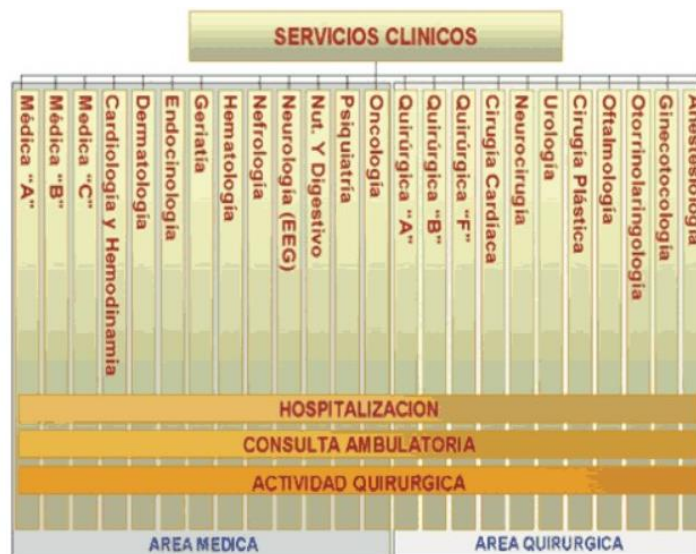


Figura 3-2: Servicios clínicos del Hospital de Clínicas, (Hospital de Clínicas, 2023)

Para poder estudiar correctamente la Sala de Emergencias, se analiza el plano en la Figura 3-3



REFERENCIAS

- 1 - Zona de reanimación
- 2 - Consultorios Médicos
- 3 - Recepción / sala de espera/ consultorio de triage
- 4 - Área de procedimientos
- 5 - Boxes: camas y sillones

- - Acceso
- - - - - Circulación interna

Figura 3-3: Plano de la emergencia señalizado

El plano de la Figura 3-3 se diferencia en distintas zonas. El área (1) hace referencia a la zona de reanimación donde entran los pacientes más críticos. El área (2) es donde se encuentran los consultorios médicos. El área (3) comprende la recepción, la sala de espera y la sala de realización de Triage, este último encargado de clasificar a los pacientes según su prioridad y los recursos disponibles. Siguiendo con la numeración (4), contiene al área de Procedimientos (área P) en donde se realizan procedimientos quirúrgicos, entre otros que necesitan una privacidad mayor al momento de ser atendidos por temas de salubridad. Por último, el área (5) es donde se encuentran los boxes con sus respectivas camas y los sillones. Esta área tiene la particularidad que fue la utilizada durante la pandemia de Covid 19 para poder mantener aislados dichos pacientes del resto para evitar la propagación del virus.

Para la clasificación del Triage de la emergencia se utiliza un sistema de codificación de colores para identificar a los pacientes según la gravedad de su condición:

Azul: No urgente o de baja gravedad.

Verde: Condición no mortal y no se necesita atención inmediata.

Amarillo: Condición médica que urgente pero no inmediata.

Naranja: Condición grave y requieren atención inmediata.

Rojo: Estado extremadamente crítico o con una condición que pone en peligro inminente su vida.

Dentro de la sala de emergencias del HC, se cuenta con distintos recursos en cada uno de los sectores. En primera instancia, se dispone de un consultorio exclusivo para realizar el Triage, lugar donde se van a discriminar a los pacientes por su gravedad. Luego, se dispone de tres consultorios médicos para la primera instancia de atención. A continuación, se encuentra una sala con 10 sillones para la atención de pacientes. La sala de emergencia cuenta con cuatro salas tipo box, con un total de 13 camas disponibles. Además, existen tres salas de reanimación con capacidad para un paciente cada una.

Dentro del área P se cuenta con dos camillas para realizar procedimientos quirúrgicos y cuatro camillas más aisladas. En la sala de cuidados intermedios se dispone de cuatro camillas a disposición. Además, se cuenta con un equipo de tomografía, otro para realizar ecografías y otro para realizar estudios con rayos X, en la otra ala del hospital. Por último, para los pacientes de color azul se cuenta con el consultorio PAR, ubicado en un contenedor fuera del plano de la emergencia.

Dentro de la sala de emergencias del HC se cuenta con un equipo médico conformado por ocho médicos generales, dos cirujanos y dos estudiantes de cirugía, así como seis médicos especialistas por guardias de 24 horas. También se dispone de siete internos, que son estudiantes de medicina general y asisten en tareas como el Triage, cuidados intermedios y otras funciones bajo la supervisión de los médicos de turno.

Para el equipo de enfermería, se cuenta con un total de 24 enfermeros por turno, distribuidos en cuatro turnos diarios: matutino de 6:30 a 12:30, tarde de 12:00 a 18:00, vespertino de 17:30 a 23:30 y nocturno de 23:00 a 7:00.

El sector de información del hospital brindó datos sobre los arribos al hospital, los estudios realizados, el color asignado a cada paciente que pasa por el Triage y la fecha y hora en la que se efectuaron.

Los documentos brindados registran información de las siguientes entidades, con sus respectivos atributos, a saber:

1. **Admisión** ID/NroRegistro/FechaInicio/FechadelIngreso
2. **Emergencia**
ID/NroRegistro/FechaIngreso/Estado/FechaComienzo/Color/FechaComienzo/FechaClasificación
3. **Solicitudes** ID/NroRegistro/FechaSolicitado/Servicio

Con estos datos, se procedió a tratar la información con la herramienta de Google Google Sheets ⁸ como también se generó un procesador de datos de Google Data Studio⁹. Se eligieron estos dos procesadores ya que son gratuitos, confiables y tienen una amplia gama de tutoriales para ser utilizados correctamente.

Para todo el análisis, se utiliza el mes de **mayo de 2022** ya que, después de realizar una evaluación de los datos y gráficos, es el mes con menos anomalías y más representativo para obtener los siguientes datos:

- **(Extraído del documento “Emergencia”) Duración promedio/mediana/moda de demora desde que arriba un paciente hasta que se le termina de hacer el Triage:** para esto se eliminaron 256 casos que se demoró más de un día, y también se eliminaron 229 casos en lo que se demora menos de un minuto, del total de 4420 entradas. Los resultados obtenidos son los que se encuentran en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Duración desde la llegada hasta el fin del Triage (Horas:Minutos:Segundos)

0:51:26	Promedio
0:38:11	Mediana
1:33:06	Moda

- **(Extraído del documento “Emergencia”) Porcentajes de Triage:** De los datos de “Emergencia” se extrae el porcentaje de cada uno de los colores para posteriormente utilizar en la simulación, como se muestra en la Figura 3-4.

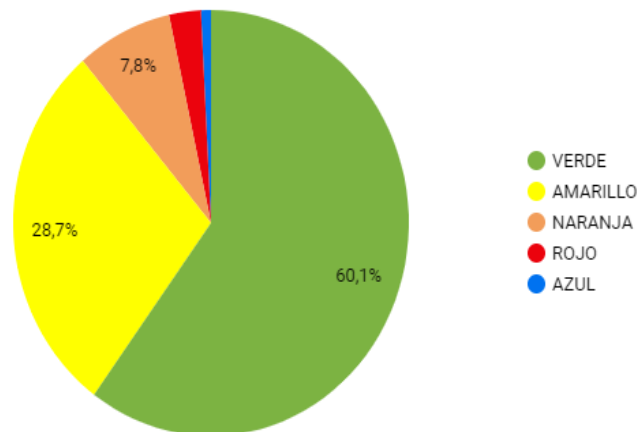


Figura 3-4: Clasificación de Triage mayo 2022, Azules 0.8%, Verdes 60.1%, Amarillos 28.7%, Naranjas 7.8% y Rojos 2.6%

⁸ [Google Sheets](#) programa de hojas de cálculo que se incluye como parte del conjunto gratuito de Google Docs Editors basado en la web que ofrece Google.

⁹ [Google Data Studio](#) herramienta en línea para convertir datos en informes y paneles informativos personalizables. Para ingresar el procesador ingresar al siguiente [link](#)

- **(Extraído del documento “Solicitudes”)** Estudios realizados: Se obtiene la división de estudios. En la Figura 3-5 se ven los resultados.

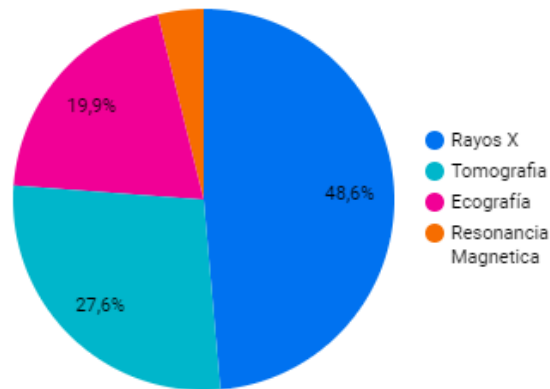


Figura 3-5: Porcentaje de estudios realizados en la sala de emergencias mayo 2022, Rayos X 48.6%, Tomografía 27.6%, Ecografía 19.9% y Resonancia Magnética 3.9%

Con estos datos también se analizó que el porcentaje de pacientes que reiteran estudios no sea mayor al 5%. Al ser menor al 1%, se decide no modelar la opción de que un paciente repita estudios en un mismo período de atención. Por último, se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** el procesador de datos completo. Se detalla la división según estudios realizados, según clasificación de Triage, y según la derivación a Hospital o CTI en conjunto con la clasificación del Triage. Por otra parte, los valores de disponibilidad de recursos de la Tabla 3-2 , cantidad de sillones, camas, médicos, enfermeros, fueron brindados por el hospital o relevados en conjunto con el personal del hospital. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se encuentran dichos valores para el denominado “caso base”, es decir la configuración actual relevada (Setiembre 2022). Cabe destacar que no se pudieron obtener datos sobre el tiempo de permanencia total ya que no se tiene un registro claro sobre el alta de las personas de la sala.

Tabla 3-2: Valores de disponibilidad de recursos, caso base

Recurso	Cantidad	Unidad
Sillones	13	Sillones
Consultorio médico	6	Unidades
Consultorio PAR	1	Unidades
Médicos	8	Personas
Técnicos en Imagen	10	Personas
Enfermeros	24	Personas
Cirujanos	4	Personas
Área P	6	Salas
Consultorio Triage	1	Unidades
Box	4	Unidades
Camas	15	Camas

4 METODOLOGÍA DEL PROYECTO

Para el desarrollo del proyecto, se ha seleccionado la metodología de trabajo propuesta por el Project Management Institute (PMI), la cual se encuentra detallada en su guía Project Management Body of Knowledge (PMBOK). Esta guía presenta los fundamentos esenciales para la gestión de proyectos, brindando información detallada sobre los procesos clave necesarios para llevar a cabo un proyecto exitoso (PMBOK, 2004).

Es importante definir que el Project Management Institute (PMI) es una organización sin fines de lucro que se dedica a promover las buenas prácticas en la gestión de proyectos a nivel mundial. La guía PMBOK, por su parte, es un estándar global para la gestión de proyectos y es considerada una de las principales referencias en la materia.

La guía PMBOK divide la gestión de proyectos en cinco grandes grupos de procesos: Inicio, Planificación, Ejecución, Seguimiento y Control y Cierre. Cada uno de estos grupos de procesos comprende una serie de etapas y actividades que son fundamentales para el desarrollo del proyecto en su totalidad. Al seguir esta metodología, se garantiza que el proyecto sea gestionado de manera efectiva y eficiente, asegurando su éxito. En la Figura 4-1 se observan los límites del proyecto.

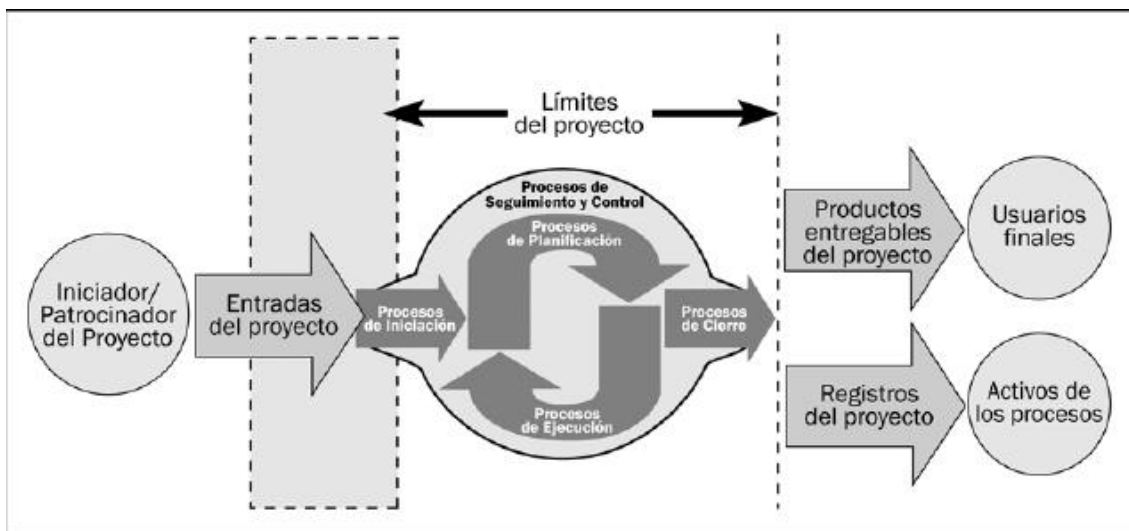


Figura 4-1: Límites del Proyecto tomado de PMBOK, 2004.

4.1 GRUPOS DE PROCESO: INICIACIÓN

El Grupo de Procesos de Iniciación, como su nombre indica, es la primera etapa en la gestión de proyectos según la guía PMBOK. Durante esta etapa se elabora el acta de constitución del proyecto, un documento que describe los objetivos y los resultados esperados del proyecto, así como las principales restricciones y supuestos que se tendrán en cuenta durante su desarrollo. Este documento es fundamental para establecer la base y la dirección del proyecto, ya que describe de manera general todo lo que se espera del mismo.

También se elabora el enunciado del alcance del proyecto en esta etapa, un documento que define los límites del proyecto y los objetivos específicos que se debían alcanzar. El enunciado

del alcance es importante porque permite a todos los interesados entender cuál es el propósito del proyecto y qué se espera lograr en él.

En resumen, la etapa de inicio del proyecto fue crucial ya que sentó las bases para todo el desarrollo posterior del mismo. A través de la elaboración del acta de constitución del proyecto y del enunciado del alcance (Anexo II) se definió el propósito, los objetivos y los resultados esperados del proyecto en conjunto con los tutores.

4.2 GRUPOS DE PROCESO: PLANIFICACIÓN

Los procesos de planificación incluyen la identificación, definición y refinamiento del alcance del proyecto, así como la planificación de las actividades que se llevarán a cabo. A medida que se tiene nueva información sobre el proyecto, se identifican y resuelven nuevas dependencias, requisitos, riesgos, oportunidades, asunciones y restricciones. Los cambios significativos durante el ciclo de vida del proyecto requieren revisar y actualizar los procesos de planificación y, posiblemente, algunos de los procesos de iniciación (PMBOK, 2004).

En este grupo de procesos, se llevaron a cabo reuniones con las partes interesadas, incluyendo a los funcionarios del hospital, los tutores y los estudiantes, para comprender la situación actual de la emergencia del HC y abordar sus principales problemáticas a lo largo del proyecto. También se desarrolla una matriz de riesgos del proyecto y se establece un plan de mitigación, se adjunta en el Anexo II, sección 5.

Se determina la frecuencia de las reuniones, los involucrados y sus responsabilidades mediante una matriz RACI (Matriz de asignación de responsabilidades), tanto con los funcionarios del hospital como con los tutores. Además, se genera una primera versión del cronograma a ejecutar y la formulación del problema a trabajar. Todo ello permite una adecuada planificación y organización del proyecto.

4.3 GRUPOS DE PROCESO: EJECUCIÓN

El Grupo de Procesos de Ejecución es una de las cinco etapas de la gestión de proyectos según la guía PMBOK, que se enfoca en llevar a cabo el trabajo definido en la planificación del proyecto para cumplir con los objetivos establecidos.

Se realiza un “Estado del Arte” o revisión de la literatura sobre las técnicas de simulación y optimización aplicadas al sector hospitalario, como parte de las actividades de investigación del proyecto (ver Anexo I). Se llevan a cabo varias actividades para el desarrollo del modelo conceptual, como la recopilación y análisis de datos, la construcción del modelo, la validación de suposiciones y la verificación y validación. También se realizan experimentos y se documentan los resultados.

Para garantizar la correcta ejecución del proyecto, se trabaja en estrecha colaboración con el equipo de proyecto, los tutores y los funcionarios del hospital. Se realizan reuniones periódicas y se hacen ajustes según las necesidades identificadas durante la ejecución del proyecto.

4.4 GRUPO DE PROCESO: SEGUIMIENTO Y CONTROL

El Grupo de Procesos de Seguimiento y Control supervisa y controla el trabajo realizado en el proyecto, así como el esfuerzo general del mismo (PMBOK, 2004).

Durante esta etapa, se lleva a cabo un monitoreo constante del progreso del proyecto, comparando los resultados obtenidos con los objetivos establecidos en la etapa de planificación. Se realizan seguimientos periódicos del avance del proyecto y se identifican y gestionan los riesgos y problemas que surgen durante la implementación del modelo conceptual. Se realizan ajustes y correcciones necesarias para asegurar que el proyecto se mantenga en línea con los objetivos establecidos, a la vez que se adapta a las dificultades encontradas durante las etapas de ejecución.

Además, se realizan revisiones y análisis detallados de los datos obtenidos de la simulación, y se toman conclusiones basadas en los resultados obtenidos. Asimismo, se mantiene una comunicación constante con el equipo de investigación, tutores y funcionarios del hospital para informar sobre el progreso del proyecto.

Finalmente, se elabora un informe detallado del proyecto, documentando todas las actividades realizadas, los resultados obtenidos, las lecciones aprendidas y las recomendaciones para futuros trabajos similares. Con esta información, se procede a realizar la conclusión formal del proyecto y a la entrega de los resultados finales.

4.5 DOCUMENTOS APLICABLES AL PROYECTO (DAP)

En esta sección se detallan todos los documentos aplicables al proyecto, como el acta de constitución, enunciado del alcance, cronograma, matriz RACI, matriz de riesgos y las actas de las actividades realizadas. En el Anexo II se encuentra también la matriz DAP, que muestra en qué etapa se realizaron y revisaron cada uno de estos documentos.

4.5.1 Acta de constitución

El acta de constitución del proyecto es un documento que explica la problemática a trabajar y los involucrados del proyecto. Esta acta describe de manera concisa los elementos esenciales del proyecto, incluyendo su objetivo, finalidad, descripción, beneficios e involucrados. Se ubica en el Anexo II, sección 1.

4.5.2 Enunciado del alcance

El acta de constitución del proyecto es un documento que explica la problemática a trabajar y los involucrados del proyecto. Esta acta describe de manera concisa los elementos esenciales del proyecto, incluyendo su objetivo, finalidad, descripción, beneficios e involucrados. Se ubica en el Anexo II, sección 1.

4.5.3 Matriz RACI

La Matriz RACI es una herramienta utilizada para asignar los distintos hitos o tareas principales a cada uno de los involucrados del proyecto. La palabra RACI proviene de la sigla R.A.C.I, en donde cada letra significa lo siguiente:

- **Responsable:** Responsable de realizar la tarea/hito.
- **Accountable:** Responsable de que la tarea/hito se lleve a cabo.
- **Consulted:** Consultados para aportar información o validar lo realizado en la tarea/hito.

- Informed: Informados sobre el progreso/resultados.

Ver el detalle en Anexo II, sección 6.

4.5.4 Matriz de riesgos

La Matriz de Riesgos es una herramienta para identificar, evaluar y gestionar los riesgos potenciales del proyecto. A cada riesgo se le asigna una probabilidad de ocurrencia, un valor de impacto que tendría sobre el proyecto si ocurriera, acciones preventivas, correctoras y el disparador correspondiente.

Se destaca que la matriz de riesgos es clave para poder gestionar de forma premeditada riesgos como el de “Al momento de ejecutar la simulación, la información necesaria no es suficiente, no es existente o no se pudo proveer por el Hospital de Clínicas o las fuentes consultadas”, así como también el riesgo de “No obtener una licencia del software de simulación sin costo o a bajo costo”. Ver en detalle en el Anexo II, sección 5.

5 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA Y MODELADO

La sala de emergencia del HC funciona las 24 horas del día los 365 días del año. Al llegar al hospital, cada persona debe presentarse en la recepción y allí se realiza el ingreso del paciente al sistema del hospital. Luego de esto se lo hace pasar a la sala de espera ubicada al costado de la recepción para que aguarde su turno para el Triage.

Existe un consultorio de Triage con capacidad de una persona. Allí la persona ingresa una vez se la llame y se le hacen preguntas básicas de su situación y se le asigna un color según la gravedad del caso. Según sea el color designado, el flujo de cada paciente es distinto:

Si se le asigna el color **Azul** o algunos casos leves del **Verde** (un 40% de pacientes verdes según lo acordado con los médicos del HC), la persona debe dirigirse hasta el consultorio PAR¹⁰, donde debe aguardar hasta que sea llamado por el médico y allí se evalúa la situación mediante preguntas y/o estudios, y dependiendo del caso lo deriva a especialista, estudios o medicación.

Si se asigna el color **Verde**, la persona debe aguardar en la misma sala que estaba aguardando para el Triage. Una vez sea llamado para entrar al consultorio, debe dirigirse hasta allí y el médico estudiará el caso. El médico puede derivarlo al hospital y así dar de alta al paciente, o ingresarlo a sillones. Si ingresa a sillones, debe aguardar en la misma sala hasta que sea llamado y allí se le hacen estudios primarios, se lo deriva a Tomografía, Rayos X o Ecografías, y los médicos revisan el caso según tengan disponibilidad. Esto se da hasta que la persona sea dada de alta, se ingresa a hospital o fallezca.

El caso de los **Amarillos** sucede lo mismo que con los **Verdes**, pero con la diferencia de que los **Amarillos** pueden ser asignados a sillones o a camas, y la prioridad que tienen con respecto a los **Verdes** es mayor.

Los **Naranjas** difieren en la manera en la que ingresan al hospital. Este tipo de casos ingresa directamente a la sala de reanimación, allí se trata de estabilizar a la persona y luego se la deriva a un sillón, una cama o a cuidados intensivos dependiendo del caso. La diferencia que tiene el espacio de cuidados intensivos es una mayor frecuencia de visitas médicas, como también un lugar especial dentro de la sala. Estos casos también tienen visitas de médicos, son a estudios hasta que sean dados de alta, ingresen al hospital o fallezcan. El triage se realiza posterior al ingreso de la persona para llevar registro.

Por último, en el caso de los **Rojos**, son los pacientes con mayor gravedad. Estos ingresan directamente a la sala de reanimación también y tienen mayor prioridad que cualquier otro de los colores. Luego que se los estabiliza pueden pasar a Centro de Tratamiento Intensivo (CTI), ingresar a la sala de emergencias o fallecer según sea el caso.

5.1 RESULTADOS ESPERADOS

El resultado esperado del trabajo es desarrollar un estudio de simulación con optimización a partir del modelado de la Sala de Emergencia del HC. Además, se espera realizar un análisis de

¹⁰ Policlínica de Atención Rápida

diferentes escenarios variando la disponibilidad de recursos para poder encontrar una configuración de estos que disminuya el tiempo de permanencia de los pacientes.

Otro de los resultados esperados es la obtención de datos precisos sobre la duración de la estancia de los pacientes en función de su clasificación de prioridad. Esto implica medir el tiempo de permanencia desde el momento de llegada hasta ser clasificados por el proceso de Triage, así como el tiempo de permanencia posterior al Triage hasta que el paciente abandone la sala de emergencia. Estos datos permitirán tener una visión clara de los tiempos de espera en diferentes situaciones y escenarios. A su vez, esto permitirá validar la hipótesis planteada por el equipo de gestión de la sala de emergencia, la cual afirma que el tiempo de espera de los pacientes menos graves es alto, pero no se tienen registros.

Mediante la comparación de los tiempos de permanencia obtenidos en los distintos escenarios se espera poder recomendar una configuración de recursos más eficiente, que permita reducir los tiempos de espera y mejorar la atención a los pacientes de menor gravedad.

5.2 MODELADO DE LA ESTRUCTURA ESTÁTICA Y LOS FLUJOS

Para el abordaje del problema de tiempos de permanencia de los pacientes en la sala de emergencia del Hospital de Clínicas se utiliza la técnica de Simulación a Eventos Discretos (SED). Como fue mencionado en la Sección 1.2, el software a utilizar para poder realizar dicho estudio es AnyLogic, en su versión Personal Learning Edition. Se realiza un relevamiento del flujo actual del hospital mediante reuniones con el personal encargado de la sala de emergencia del HC y eso es plasmado en el software. Luego, se pasa a realizar análisis de distintos escenarios, en donde se quiere ver cómo impacta en el tiempo de permanencia de los pacientes dichas variaciones.

El objetivo del modelado es poder encontrar configuraciones de recursos que permitan que el paciente permanezca menos tiempo dentro de la sala de emergencias. De esta forma la calidad del servicio se ve mejorada y se reducen riesgos de que los pacientes sufran consecuencias por no ser atendidos en su debido momento por no tener los recursos necesarios.

Un aspecto que se debe tener en cuenta es que la simulación utiliza datos de 30 días de atención al público, sin distinción entre días laborales o no; este mismo análisis en el que no se distingue tipo de días es aplicado para la tasa de arribo.

Para poder encontrar el estado estacionario (ver Sección 2.3) se realizó un análisis comparando los resultados de salida con la base de datos brindada por el hospital. El período para llegar al estado estacionario es de un día. Alcanzar el estado estacionario de una corrida implica solamente un día, es decir 3.3%, por lo que se entiende indiferente dicho porcentaje sobre el total en los resultados obtenidos.

La cantidad de replicaciones para cada escenario estudiado necesarias para el análisis se define para cada caso. Los resultados son monitorizados y al dejar de obtener variaciones en la media de los datos se obtiene el número de iteraciones de una misma prueba.

Además, no hay una distinción entre el nivel del personal, es decir que un Auxiliar de Enfermería como un Enfermero se consideran como un mismo recurso denominado: Enfermeros. En el modelo, la ubicación de los estudios de Imagen se encuentra dentro del establecimiento de la emergencia en la simulación, aunque en realidad se encuentre en otra

área por facilidad de modelado. El tiempo de traslado se tiene en cuenta si un paciente se atiende en dicha área.

Para llevar a cabo las pruebas de experimentación, las entradas del modelo de simulación se varían según el escenario que se esté estudiando. Para los distintos casos, se ingresan distintas cantidades de recursos y porcentajes de distribución de los pacientes según estudios realizados y según color. Dentro de los factores que también se encuentran en los datos de entrada están las dimensiones de la sala de emergencias y la tasa de arribo de los pacientes.

Los resultados de interés dentro de los datos de salida son: los tiempos de permanencia hasta ser clasificados en el Triage y los tiempos de permanencia para cada una de las clasificaciones luego del Triage.



Figura 5-1: Representación de la emergencia en AnyLogic

El modelado se realizó utilizando el Software Anylogic versión 8.8.1 Personal Learning Edition, mediante las herramientas de dicho software mencionadas en la Sección 6.2. Se tomó la información del plano brindado por el personal del hospital y se utilizó la herramienta de diseño 3D para poder obtener una simulación más amigable para todas las partes interesadas. Se diseñó la representación del plano dentro del modelo de simulación, como se muestra en la Figura 5-1.

Se construyó el modelo mediante la conexión de todos los bloques necesarios para el flujo, tanto los de movimientos de los pacientes como los de asignaciones de salas y recursos.

A continuación, se presenta el flujo del modelo que permite visualizar las distintas etapas en las que se divide el registro del tiempo de permanencia de los pacientes. Se han incluido figuras con el objetivo de proporcionar una representación visual de estas etapas.

En el análisis se han considerado las siguientes abreviaciones utilizadas para clasificar a los pacientes y sus respectivas trayectorias:

- Pacientes clasificados Azules: Azules
- Pacientes clasificados Verdes con trayectoria de flujo 1: Verdes 1

- Pacientes clasificados Verdes con trayectoria de flujo 2: Verdes 2
- Pacientes clasificados Amarillos con trayectoria de flujo 1: Amarillos 1
- Pacientes clasificados Amarillos con trayectoria de flujo 2: Amarillos 2
- Pacientes clasificados Naranjas con trayectoria de flujo 1: Naranjas 1
- Pacientes clasificados Naranjas con trayectoria de flujo 2: Naranjas 2
- Pacientes clasificados Rojos: Rojos

Los pacientes ingresan y esperan a ser registrados en mesa de entrada (Registro), para posteriormente esperar a ser atendidos para el Triage (Triage), una vez clasificados el flujo se divide por colores. En la Figura 5-2 se tiene flujo desde el arribo de los pacientes hasta ser clasificados. Los recursos necesarios para realizar el Triage son de un enfermero, más una sala de Triage. Para el Registro de los pacientes, se necesita un administrativo en cada momento, y la recepción.

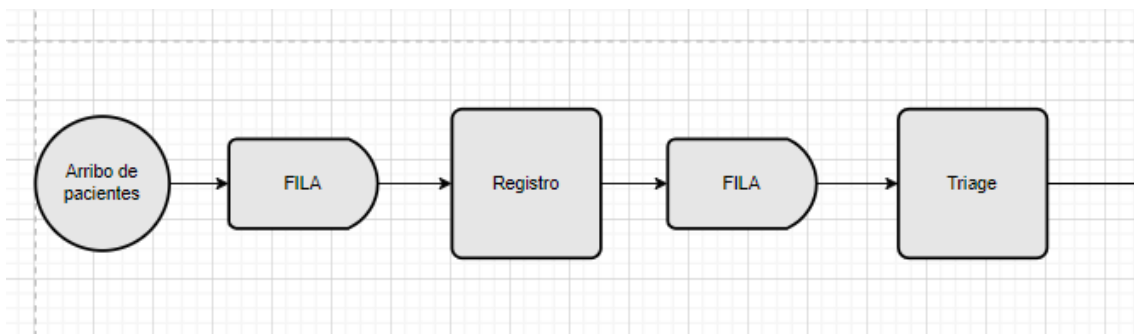


Figura 5-2: Flujo desde el arribo de los pacientes hasta ser clasificados

En el caso de los **Azules** (ver Figura 5-3), luego de haber pasado por el Triage esperan su turno para el área PAR, se los deriva a estudios básicos y posteriormente se les da de alta. Para el estudio PAR los recursos que se utilizan es un enfermero. A este flujo se le suma los pacientes **Verdes 1** que son aquellos que se entiende que no necesitan realizarse estudios en la emergencia y son trasladados a estudios PAR.

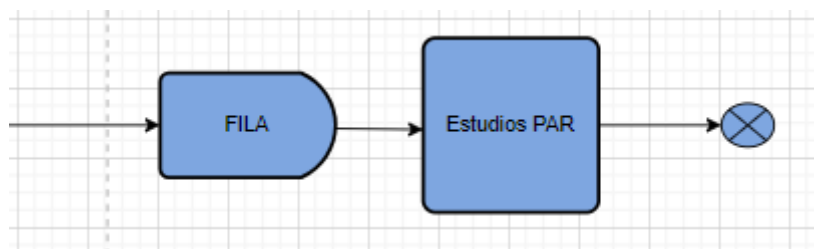


Figura 5-3: Flujo pacientes Azules y Verdes1

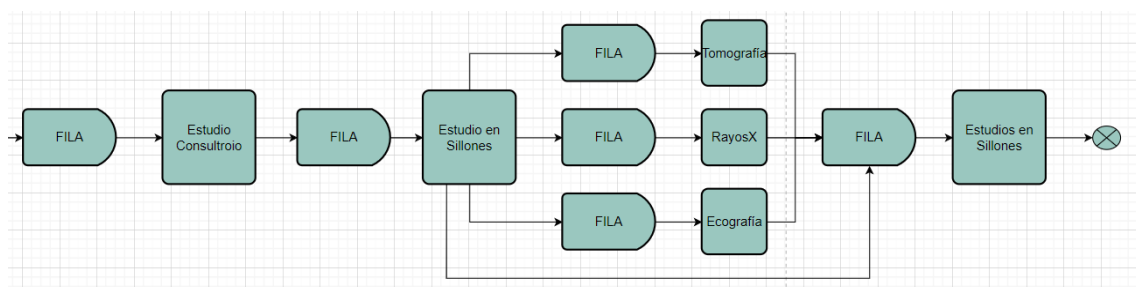


Figura 5-4: Flujo de pacientes Verdes2

Los pacientes **Verdes 2**, luego de ser clasificados son atendidos en un consultorio por un médico. Después esperan a que se les asigne un sillón para que se le realicen estudios con un enfermero. Según el caso los pacientes pueden tener estudios de Tomografía, Rayos X y Ecografía. Por último, se le realicen estudios y controles finales y son dados de alta de la emergencia.

El caso de los **Amarillos**, una vez sean clasificados, esperan su turno para ingresar al consultorio, utilizando el recurso de un médico y de un consultorio. Posteriormente, se los envía a estudios primarios y se derivan a Sillones, Boxes o al área P. El caso de los sillones y boxes, se derivan entre Tomógrafos, Ecografías, Rayos X (utilizando la sala del estudio correspondiente y una persona del equipo de imagen), o sin estudios, luego de esto, un enfermero revisa al paciente y se da de alta o se deriva a internación. El modelado de los **Verdes** es igual al de los **Amarillos 1** con la diferencia de que solo utilizan sillones, ver Figura 5-4. El flujo de los **Amarillos 1** se observa en Figura 5-5.

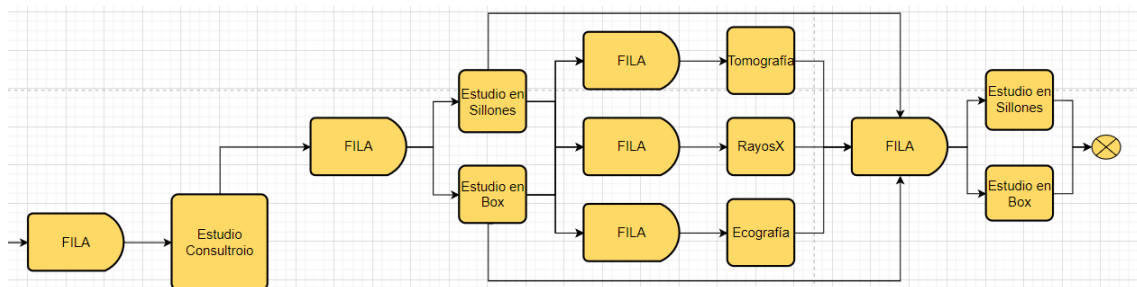


Figura 5-5: Flujo pacientes Amarillos1

Por otra parte, a los derivados al área P se les realiza estudios y luego sigue su atención en el área P. Estos pacientes son los denominados **Amarillos 2**. Su flujo se observa en Figura 5-6.

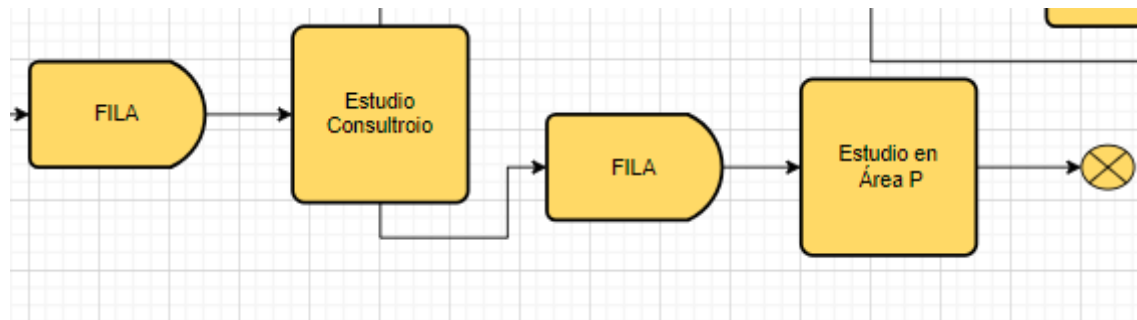


Figura 5-6: Flujo pacientes Amarillos2

En el caso de los **Naranjas**, también se dividen en Tipo 1 y 2. Los de tipo 1 son los más leves, se modelan similar a los **Amarillos** con la diferencia de que posterior a los estudios primarios tienen una visita médica y luego se los deriva a estudios específicos. Su flujo se marca en la Figura 5-7.

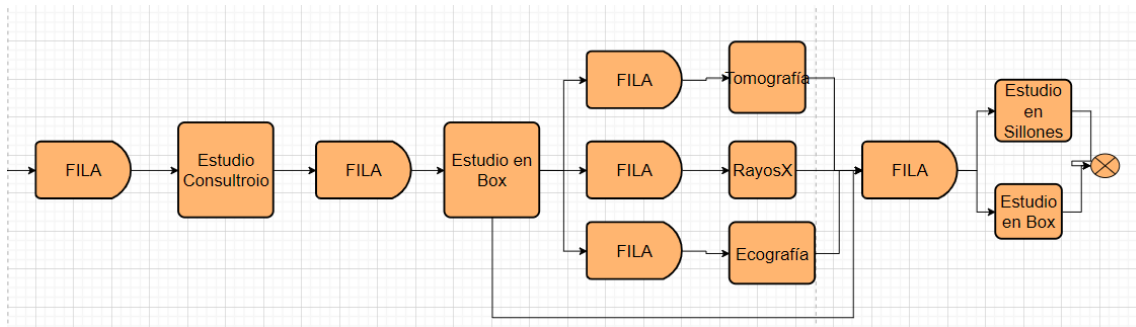


Figura 5-7: Flujo pacientes Naranjas1

Los **Naranjas 2**, son más críticos que los anteriores. Estos se modelan luego del Triage como que esperan la atención de un médico y un enfermero en la sala de reanimación. Luego de que se estabiliza se realizan estudios primarios y posterior a esto se tiene varias visitas médicas en cuidados intensivos hasta que se los da de alta.

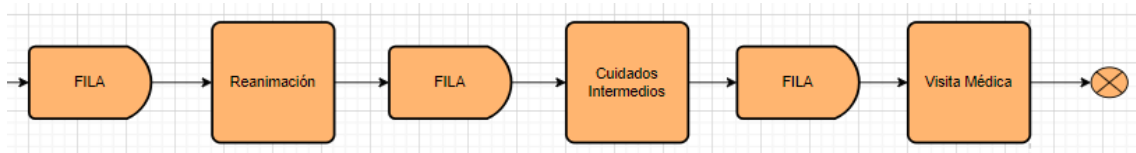


Figura 5-8: Flujo pacientes Naranjas2

En el caso de los **Rojos**, los atiende un médico junto a un enfermero en la sala de reanimación, para que una vez estén estabilizados sean internados en el CTI del hospital. En la Figura 5-9 se observa su flujo.

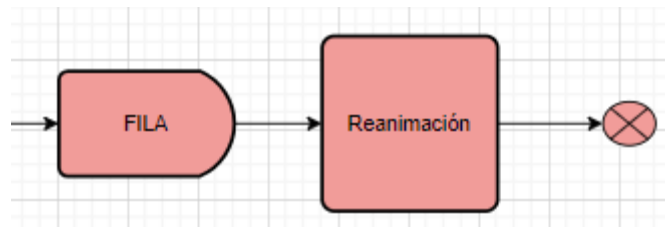


Figura 5-9: Flujo pacientes Rojos

5.3 MODELADO DE TIEMPOS ENTRE ARRIBOS Y TIEMPOS DE ACTIVIDADES.

La tasa de arribo es el valor que determina la frecuencia con la que llegan los pacientes al sistema, por esta razón es necesario encontrar la distribución que se ajuste correctamente al modelo.

Para esto se utilizó el software Input Analyzer 11, que permite realizar análisis estadísticos y generar curvas de ajuste. Input Analyzer es una herramienta de Arena Simulation Software, la cual selecciona y ajusta distribuciones de probabilidad a sus datos de entrada. Esta herramienta puede manejar datos discretos y continuos, y a la vez, puede comparar diferentes

¹¹ Herramienta de análisis de datos <https://analyzer.softonic.com/>

distribuciones en función de varios criterios, como pruebas de bondad de ajuste, diagramas gráficos y estadísticas de resumen. Permite el ajuste de los datos de entrada a distribuciones predefinidas, como normal, exponencial, uniforme, Poisson, etc. Input Analyzer compara diferentes distribuciones según varios criterios, como las pruebas de Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling o Chi-Square, el error cuadrático medio (Input Analyzer, 2023). Para poder realizar el análisis de la tasa de arribo, se toman todas las entradas en un mes, obtenidas del Documento “Admisión”. De allí se extrae el minuto de cada llegada y se utiliza para crear un histograma que representa la distribución de las llegadas de pacientes al sistema en el mes de mayo.

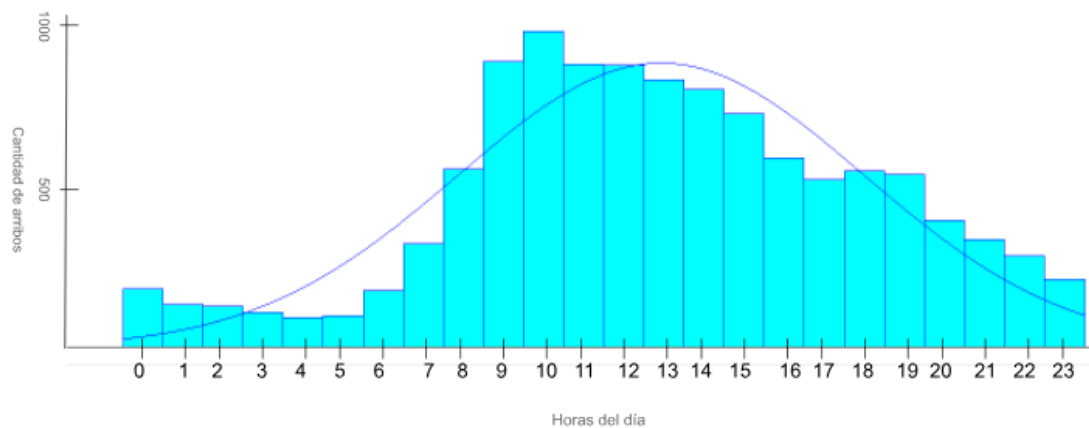


Figura 5-10: Ajuste de la distribución Normal a los datos empíricos en Input Analyzer. En el eje X se tiene una barra equivalente a 1 hora del día, siendo la primera 00:00. En el eje Y se tiene la cantidad de arribos de pacientes en cantidades totales.

En la Figura 5-10 se muestra el histograma y la curva de ajuste que representa la distribución de probabilidad normal ajustada a los datos obtenidos. De este análisis se obtiene la tasa de arribo y el promedio de pacientes por día. La curva obtenida que se ajusta a los datos es una distribución normal en minutos de mediana 805 minutos y desviación estándar 303 minutos. Se puede observar en la Figura 5-10 que la forma de la curva verifica el ajuste a los datos. Esto implica que a la hora 13:00 es el momento con tasa de arribo más alta. A su vez, se obtiene un promedio de arribos de 147 pacientes por día. Este número se calcula realizando una distinción de la cantidad de arribos por hora y dividido la cantidad de días de la base de datos, es decir, 30; luego se sumaron la cantidad de pacientes por días.

Para los tiempos de duración del Registro de pacientes, el Triage, Consultorios, Estudios primarios, Consultorio PAR, tomografía, Rayos X, Ecografía, entre otros, se modelan como una distribución triangular (tiempo mínimo, medio y máximo) validada por el equipo de gestión del HC, ya que no se tienen datos reales de la duración. Estos valores se pueden observar en la Tabla 5-1.

¹² Para ver el detalle de los ingresos y del procesamiento de datos, consultar el siguiente [link](#).

Tabla 5-1: Modelo de distribución para los tiempos de atención

Estación	Modelo de distribución (en minutos)
Registro	triangular (3, 5, 6)
Triaje	triangular (3,5,7)
Consultorio PAR	triangular (15, 30, 45)
Consultorio Verdes	triangular (15, 20, 25)
Consultorio Amarillos	triangular (20, 25, 35)
Consultorio Naranjas 1	triangular (20, 30, 40)
Consultorio Naranjas 2	triangular (50, 80, 120)
Estabilización Rojos	triangular (10, 20, 40)
Estudios primarios en sillones	triangular (15, 20, 25)
Estudios primarios en Box	triangular (15, 20, 30)
Estudios primarios área P	triangular (15,20,30)
Visita enfermero/médico (sillones o box)	triangular (10, 15, 20)
Visita médica inicial cuidados intermedios	triangular (50, 120, 140)
Visita médica rutina cuidados intermedios	triangular (20, 30, 40)
Tomografía	triangular (15,20, 30)
Rayos X	triangular (10, 15,20)
Ecografía	triangular (10, 15, 20)

6 VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

Esta sección detalla el proceso de verificación y validación del modelo de simulación a tiempos discretos de la sala de emergencia del Hospital de Clínicas.

El objetivo principal de la verificación es detectar defectos en el sistema para corregirlos y evaluar la calidad del producto (Curso Ingeniería de Software, 2008). Por otro lado, la validación es el proceso de determinar si el modelo de simulación es preciso y adecuado en la representación del modelo real. Si un modelo es válido, puede ser utilizado para tomar decisiones sobre el sistema que se está estudiando (Law, 2013).

El plan de verificación y validación se ha desarrollado para evaluar si el modelo cumple con los requisitos y criterios especificados en cada prueba. Las pruebas de verificación se utilizan para asegurarse de que el modelo sea capaz de proporcionar resultados consistentes y predecibles, mientras que las pruebas de validación se utilizan para evaluar si el modelo es aplicable a situaciones reales y proporciona resultados precisos y útiles (Roza et al., 2012).

6.1 PRUEBAS DE VERIFICACIÓN

En este apartado se detallan las pruebas de verificación del modelo de simulación. Para las distintas pruebas de verificación, se propone correr el modelo reiteradas veces con una duración de un mes, variando el valor semilla en cada ejecución. Para cada prueba se toman los datos de salida y luego para cada tiempo de permanencia estudiado se hace un promedio de todas las ejecuciones. Esto permite verificar si el modelo es capaz de proporcionar resultados consistentes y si es sensible a cambios en los valores de entrada (Roza et al., 2012).

6.1.1 Prueba de verificación global.

El primer conjunto de pruebas que se llevan a cabo son las relacionadas a correr el modelo y verificar que el flujo de este sea continuo y no se tengan interrupciones. Para ello se mantienen todas las condiciones básicas del modelo y se varía la semilla del modelo.

Luego de correcciones de capacidad y de conexiones dentro del modelo en AnyLogic, se logra que el modelo se ejecute hasta que se llega al límite de 50.000 agentes que la versión Learning 8.8.1 de AnyLogic impone, por lo que se da como satisfecha dicha prueba.

A continuación, se valida para cada color de Triage que el modelo cumpla con todos los puntos del flujo de pacientes detallado en la Sección 5.2.

6.1.1.1 Verificación del flujo de los pacientes azules

Los pacientes **Azules**, luego de que sean clasificados como nivel azul, pasan a la fila de espera del consultorio PAR (Figura 6-1, delay6), para luego ser atendidos en el consultorio (Figura 6-1, EstudiosAzul) y luego se les asigna el alta (Figura 6-1, releasepar1 - Salida).

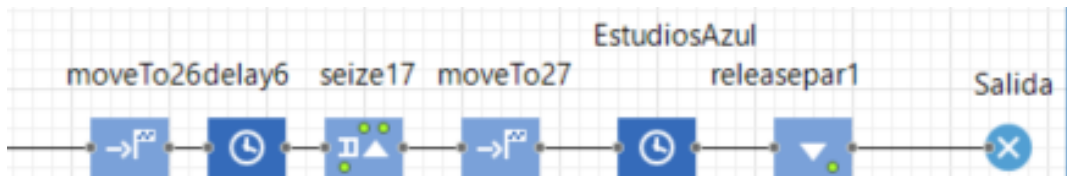


Figura 6-1: Flujo pacientes Azules/Verdes1 en AnyLogic

6.1.1.2 Verificación del flujo de los pacientes Verdes 2

Para los pacientes **Verdes 2** se verifica que luego de ser clasificados, pasen a la sala de espera para poder ser atendidos en un consultorio por un médico (Figura 6-2, Estudios Verde 2). Siguiendo el recorrido de un agente en especial, se verifica que después que el médico diagnostique el problema, retorne a la sala de espera (Figura 6-2, delay 1). Allí, realizan la fila para poder ser atendido en los sillones en el que se le realizan los primeros estudios preliminares (Figura 6-2, Estudios Verde). Luego se verifica que el flujo de los pacientes se comporte como esperado ya que en el caso de que el médico así lo haya indicado los pacientes pasan por estudios especiales como ser el tomógrafo, rayos X o ecografía (Figura 6-3, Tomografía, Rayos X y Ecografía). Luego estos estudios el comportamiento es el adecuado ya que son otra vez asignados en un sillón (Figura 6-3, Estudios Sillones Verde) y cuando un enfermo se encuentre disponible le realiza un último chequeo y son dados de alta (Figura 6-3, alta3).

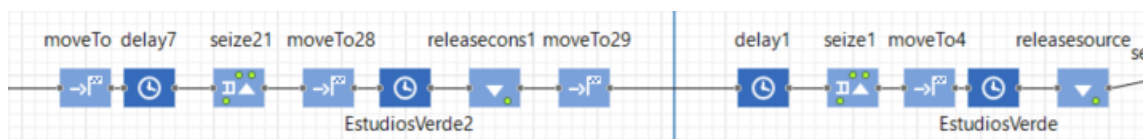


Figura 6-2: Flujo pacientes verdes2 en Anylogic. A

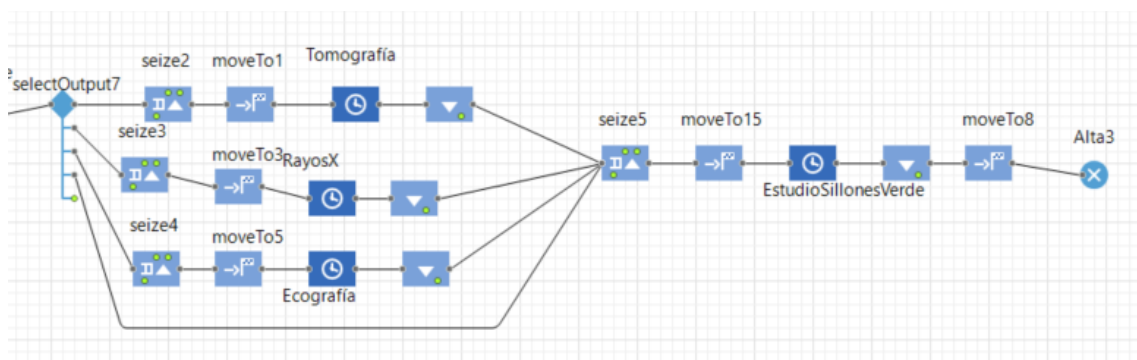


Figura 6-3: Flujo pacientes verdes2 en Anylogic B

6.1.1.3 Verificación del flujo de los pacientes Amarillos

Para los pacientes **Amarillos** se verifica que un recurso del tipo médico los atiende en un consultorio (Figura 6-4, delay1), luego dependiendo de su diagnóstico pueden ser derivados al área P, lugar de procedimientos quirúrgicos (Figura 6-4, Estudios3areaP) o a otros estudios. Se verifica que este tipo de pacientes sean los que utilizan esos recursos.

Allí cada paciente debe esperar a que sea asignado a una camilla, en donde es atendido por un cirujano. Luego de que se le realice dicha cirugía y sea atendido por un enfermero, es dado de alta (Figura 6-4, sink1).

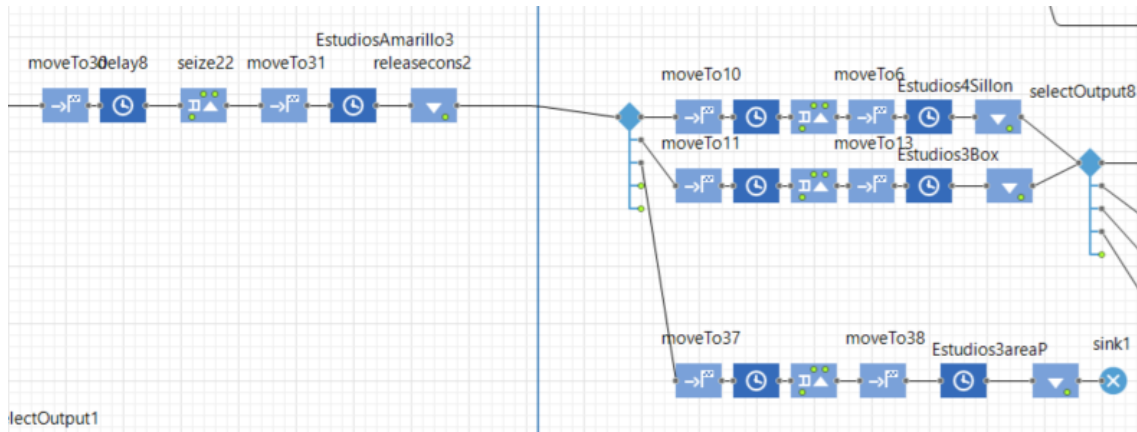


Figura 6-4: Flujo pacientes Amarillos1 en Anylogic

Se verificó que un 67% de los pacientes de Triage **Amarillo** son asignados en camillas de los boxes o sillones luego de su consulta médica (Figura 6-4, Estudios3Box o Estudios4Sillon), lo cual se da como correcto debido a que el porcentaje asignado es de 70%. Luego, si es que se les indicó realizar algún estudio, pasan a tomografía, rayos X o ecografía (Figura 6-4, Tomografía1, RayosX1, Ecografía1).

Los pacientes retornan a su sillón o camilla para que se les realice los últimos estudios dicha diferenciación viene dada con una relación 1:6 de pacientes es decir que 1 de cada seis pacientes es asignado a un sillón y el resto a una camilla. Dicha relación se da como verificada ya que dio 21,9%. (Figura 6-4, EstudioSillones1 o EstudiosBox). En este caso, la gran mayoría de los pacientes son dados de alta, pero hay un pequeño porcentaje en el que se les da el pase a internación (Figura 6-4, Alta4 o PasaInternación).

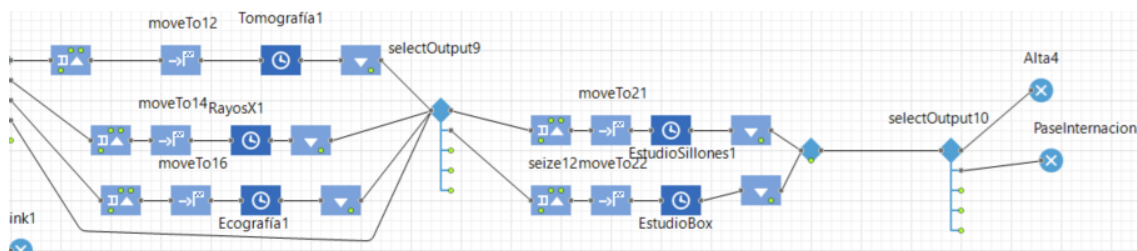


Figura 6-5: Flujo pacientes Amarillos2 en Anylogic

6.1.1.4 Verificación del flujo de los pacientes Naranjas

El caso de los pacientes de color **Naranja**, luego de ser diagnosticados en el Triage, puede haber dos posibilidades para su trayectoria:

Un porcentaje del 20% de los pacientes es transferido a las salas de reanimación (Figura 6-6, EstudiosNaranja5), dicho porcentaje se verificó obteniendo un 19,1%. En dichas salas el paciente permanece más de una hora hasta que se estabilice, luego, es llevado a la sala de

cuidados intermedios en donde se verifica la utilización de un recurso médico con una media de dos horas (Figura 6-6, VisitaMedica3). A su vez, se verifica que tienen una estadía de aproximadamente un día en dichas salas. Antes de que se le dé el alta o que tengan pase a internación, se les vuelve a realizar una última visita médica (Figura 6-6, VisitaMedica4), terminando su estadía en la emergencia.

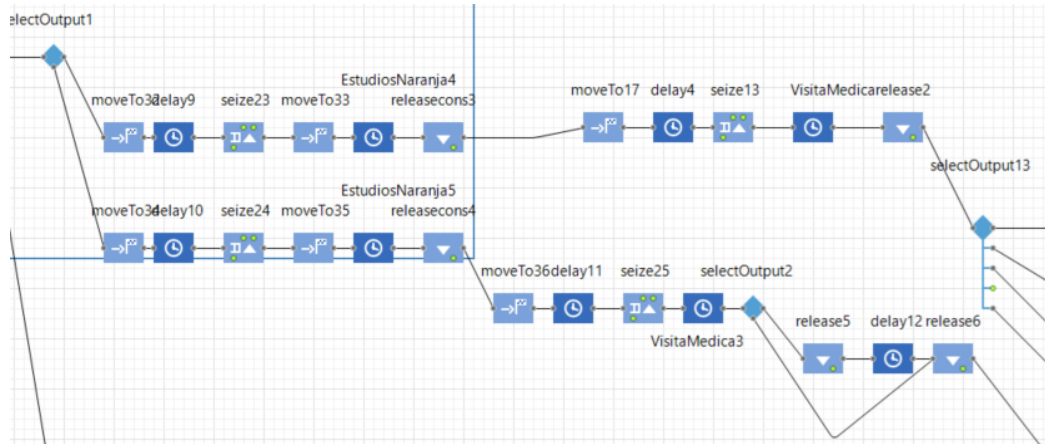


Figura 6-6: Flujo pacientes Naranjas1 en Anylogic

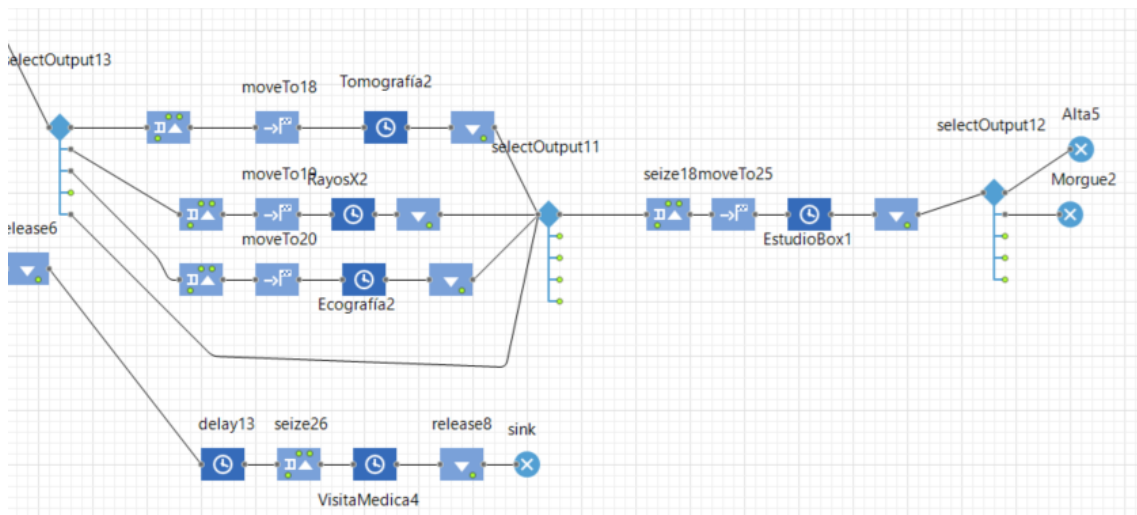


Figura 6-7: Flujo pacientes Naranjas2 en Anylogic

Los pacientes **Naranjas 1** son atendidos en boxes por enfermeros (Figura 6-7, EstudiosNaranja4) y médicos (Figura 6-7, Visitamedicarelease2), para luego, de ser necesario, sean llevados a realizar estudios del tipo tomografía, rayos X o ecografías (Figura 6-7, Tomografia2, RayosX2, Ecografia2). Antes de salir del sistema de emergencia, sea por la defunción o el alta médica (Figura 6-7, Morgue2 o Alta5), son atendidos por última vez por un enfermero (Figura 6-6, EstudiosBox1).

6.1.1.5 Verificación del flujo de los pacientes Rojos

Los pacientes de Triage clasificados como **Rojos**, llegan por ambulancia y son atendidos luego de entrar a la sala de emergencia sin hacerlos esperar. Para la simplificación del modelo, dado que el porcentaje diario de pacientes **Rojos** es muy limitado y no genera impacto en el resto de

los flujos, estos pacientes también llegan por la línea del Triage. Esto significa menos de 1.7% dentro de la totalidad de los pacientes e igualmente, en la realidad luego de que se les estabiliza se les realiza el Triage por lo que tiene sentido que utilice el recurso Triage dentro del modelo de simulación. Se verifica que dichos pacientes ingresan directamente a sala de reanimación una vez que hayan sido clasificados como **Rojos** (Figura 6-8, Visitamedicarelease3). En dicha actividad se verifica la utilización de recursos médicos, enfermeros y la sala de reanimación. Se obtuvo una media de atención de 108,9 minutos versus la estimada por la distribución triangular de 103,3, por lo que se da como verificado el tiempo de atención. Si logra estabilizarse, se le otorga el pase a la internación (Figura 6-8, Alta6), mientras que, en caso de fallecimiento, se traslada a morgue (Figura 6-8, morgue3).

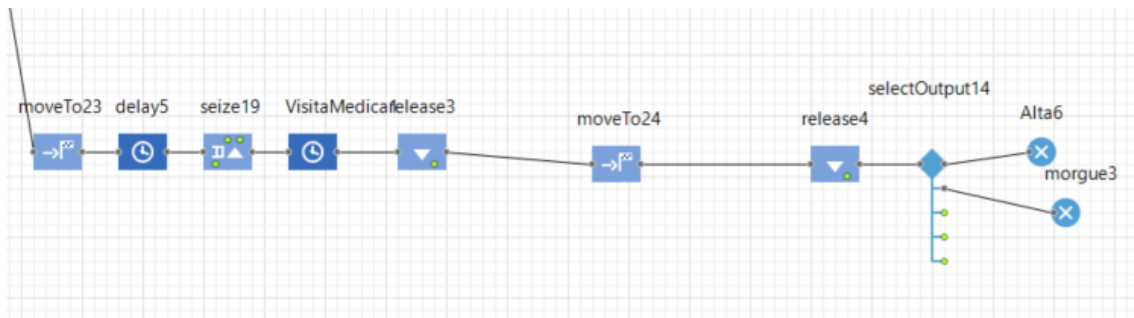


Figura 6-8: Flujo pacientes Rojos en Anylogic

6.1.1.6 Verificación del flujo de entrada

Como se detalla en la Sección 5.3, en el mes utilizado para el análisis (mayo 2022) el promedio de arribos de pacientes por día es de 147 personas y la curva que se ajusta a los arribos es una distribución normal de media 805 minutos y desviación estándar 303 minutos.

Para verificar en el modelo de simulación el promedio de arribos de pacientes por día, se generó en AnyLogic una gráfica que muestra la cantidad de entradas de pacientes que entran a la emergencia por día (ver Figura 6-9), la cual detalla el promedio de arribos por día durante 30 días. Dando un promedio en 30 días de 149 personas por día, lo cual difiere del valor real en un 1.3%, por lo que se da como verificada la prueba.



Figura 6-9: Entradas de paciente por día

En relación con la verificación anterior, se analizó el funcionamiento de la tasa de llegada de pacientes por hora, no solo por día. Para ello, se generó una gráfica dentro del modelo de simulación que ilustra la cantidad de pacientes por hora (Figura 6-10). Esta gráfica fue comparada con los datos obtenidos en la realidad (Figura 6-11).

Ambas gráficas presentan un formato similar; en las primeras horas se observa un aumento en la llegada de pacientes, seguido de un descenso. Posteriormente, hacia el mediodía, el flujo de pacientes vuelve a aumentar hasta alcanzar un punto máximo, para luego disminuir gradualmente en la noche.

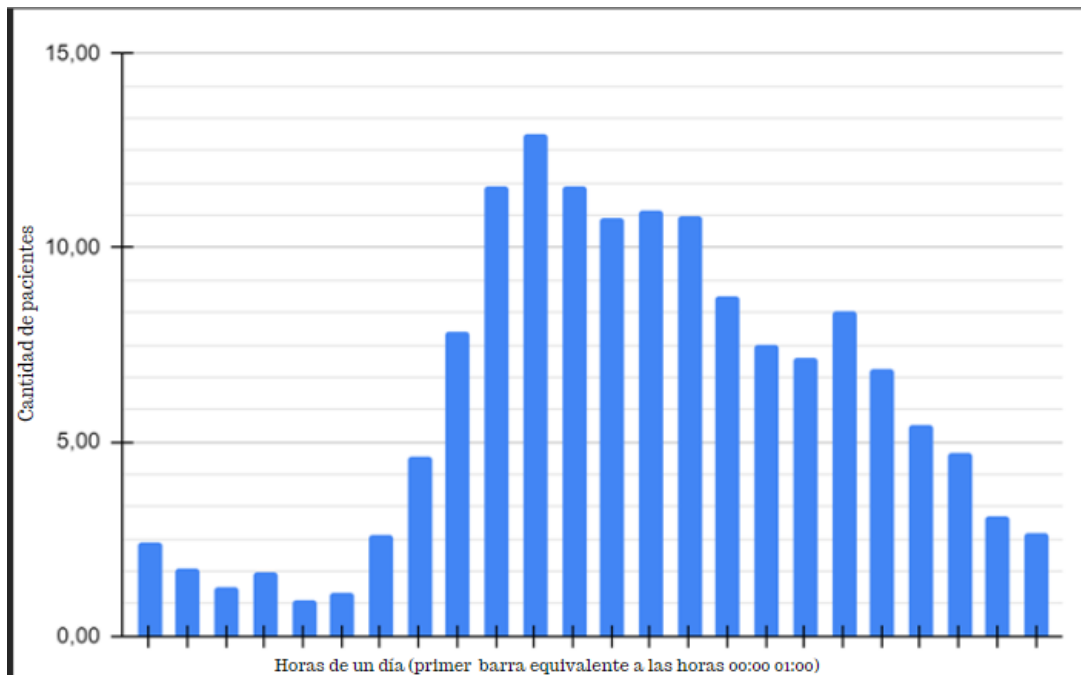


Figura 6-10: Arribos de pacientes por hora al día.

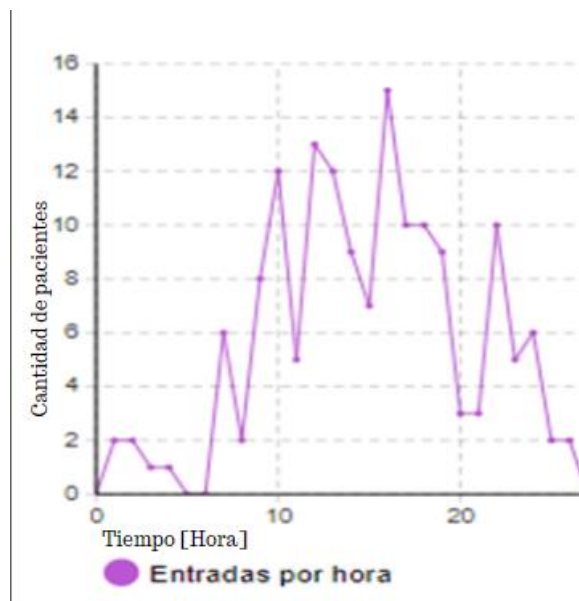


Figura 6-11: Entradas de pacientes por hora.

6.1.2 Verificación de tiempo de espera para ser clasificado

Como se detalla en la Sección 3, se ha determinado que, para el mes de mayo 2022, el tiempo promedio transcurrido desde la llegada de un paciente hasta su clasificación es de 51.26 minutos.

Para corroborar esta información, se realizaron 15 ejecuciones del modelo y se obtuvo un promedio de 54.53 minutos. El valor promedio obtenido en dichas ejecuciones no supera una diferencia del 6% de 51.26 minutos, se da como verificado que el tiempo de espera al realizar la simulación en AnyLogic.

6.1.3 Verificación de la clasificación por colores

La verificación del porcentaje de clasificación es de suma importancia, ya que el tipo de clasificación determina qué recorrido seguirá el paciente dentro de la emergencia y cuál será su prioridad para recibir atención médica.

Se detalla la cantidad de pacientes según el tipo de Triage asignado en la Sección 3.1. Estos datos son los ingresados como la probabilidad de clasificar a un paciente con este tipo de gravedad, en la Figura 6-12 se muestra cómo se ingresa al software de simulación. Posteriormente, se ejecutó el modelo durante un período de 30 días, y se graficó la media de los resultados obtenidos.

Use: Probabilities
 Conditions
 Exit number

Probability 1:	0.0101
Probability 2:	0.5584
Probability 3:	0.3401
Probability 4:	0.0746
Probability 5:	0.0168

Figura 6-12: Probabilidad de clasificación en el Triage

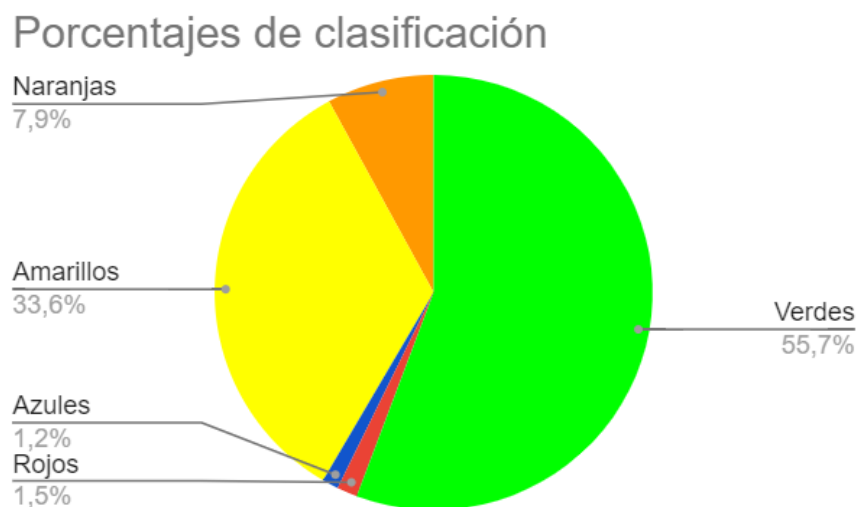


Figura 6-13: Resultados de porcentaje de clasificación de la simulación

Los resultados de la simulación muestran los siguientes promedios de clasificación según la categoría (Figura 6-13): para los pacientes **Azules** se obtuvo un promedio del 1.2%, habiendo ingresado una probabilidad del 1.01% (variación del 15.84%). En cuanto a los pacientes **Rojos**, el promedio fue del 1.5%, considerando una probabilidad ingresada del 1.68% (variación del -10.71%). Los pacientes **Verdes** presentaron un promedio de clasificación del 55.7%, habiendo ingresado una probabilidad del 55.84% (variación del -0.25%). Para los pacientes **Amarillos**, el promedio fue del 33.65%, con una probabilidad ingresada del 34% (variación del -0.88%). Por último, los pacientes **Naranjas** obtuvieron un promedio del 7.9%, habiendo ingresado una probabilidad del 7.5% (variación del 5.33%).

La mayor variabilidad obtenida fue 15.84%, pero dentro del universo total de pacientes significa una variación del 0.19%, lo que se considera dentro del rango aceptable. Por lo tanto, la prueba se determina como satisfactoria.

En la Figura 6-14 se grafica la cantidad de pacientes por clasificación que entran a la sala de emergencia por día, para poder verificar la cantidad de personas por color varíe aleatoriamente según el día.

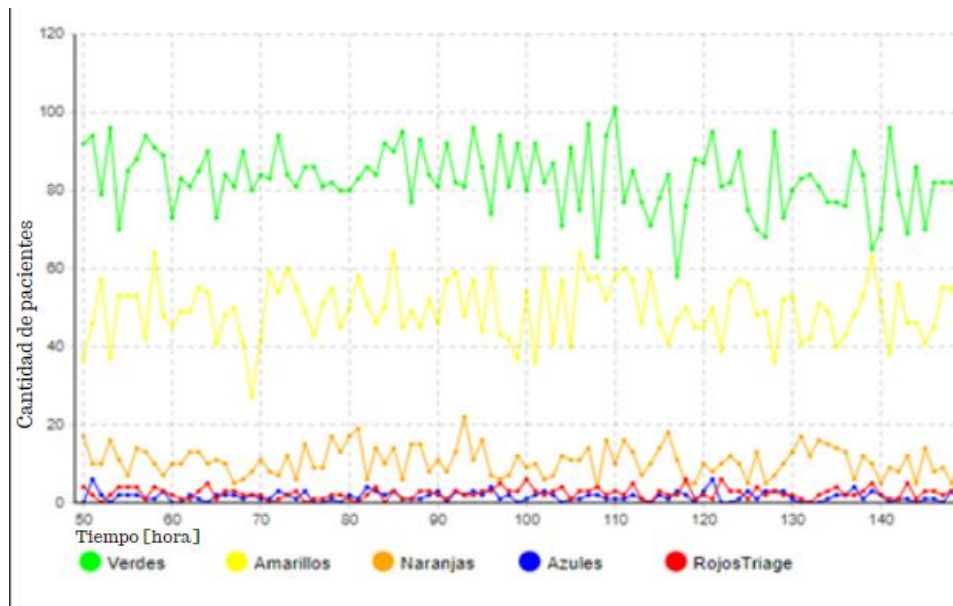


Figura 6-14: Gráfica de arribos por día por tipo de clasificación

6.1.4 Verificación del desvío del flujo de pacientes Verdes

Luego de que los pacientes **Verdes** sean atendidos en la consulta médica, el flujo dentro de la estadía del hospital puede variar al ir al tomógrafo, estudios rayos X, ecografías o seguir los estudios en el sillón al que fue asignado. En esta prueba se quiere verificar que esta bifurcación funcione correctamente de acuerdo con los valores asignados. Los mismos se observan en la Figura 6-15.

selectOutput7 - SelectOutput5

Name: Show name Ignore

Use: Probabilities
 Conditions
 Exit number

Probability 1:

Probability 2:

Probability 3:

Probability 4:

Probability 5:

Figura 6-15: Probabilidad de estudios pacientes Verdes

Después de realizar reiteradas pruebas, los resultados obtenidos para la probabilidad 1 (ver Figura 6-15), que corresponde a estudios en el tomógrafo, varían del 13.1% al 14.2%. Para los rayos X, la variación es del 24.7% al 25.6%. Mientras que, para las ecografías, la variación se encuentra entre el 13.9% y el 15.5%. En todos los casos, la variación es menor al 7.04%, lo que indica que la prueba ha sido validada con éxito y se considera aceptable.

6.1.5 Verificación de los tiempos de atención

La verificación de los tiempos de atención se realiza para asegurar que la duración de las actividades se encuentre dentro de los parámetros asignados.

Para cada actividad, se utilizan "Delays" en el sistema, donde se asignan los recursos necesarios, la ubicación de la actividad y el modelo de distribución correspondiente. En este caso, se utiliza una distribución triangular, debido a que permite representar en el modelo los valores estimados proporcionados por la contraparte del hospital. Esta elección de distribución permite obtener resultados más realistas y ajustados a las expectativas del sistema que se está simulando.

6.1.5.1 Verificación de estudios a pacientes Verdes

Se quiere verificar el tiempo asignado en el consultorio para los pacientes diagnosticados **Verdes** que lleva como media 25 minutos con una variación de cinco minutos (Figura 6-16).

EstudiosVerde2 - Delay

Name: Show name

Ignore

Type: Specified time
 Until stopDelay() is called

Delay time:

Figura 6-16: Tiempo de atención en consultorio médico, Verdes

Para poder medir el tiempo de dicha consulta en AnyLogic se agregaron dos relojes, "TimeMeasureStart" y "TimeMeasureEnd" los cuales deben ser conectados mutuamente y ubicados al inicio y al final de la actividad que se quiere evaluar, como se muestra en la Figura 6-17.

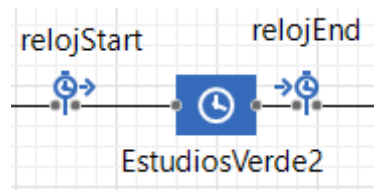


Figura 6-17: Ilustración de medición de tiempo en AnyLogic

Los resultados obtenidos de 15 pruebas con semillas aleatorias dieron una media de 24.88 minutos y un valor mínimo y un máximo de 20.08 y 29.72 minutos, por lo que se entiende que los tiempos asignados funcionan correctamente. Este mismo procedimiento se repite análogamente para las siguientes pruebas de verificación de tiempo de atención.

6.1.5.2 Verificación del tiempo de atención en el Tomógrafo

Para el estudio en el tomógrafo, el tiempo de atención que se designó es una distribución Triangular (20, 40, 120) en minutos, acordada con el personal médico. Los tiempos de atención obtenidos son los que se muestran en la Figura 7-18. En esta figura se observan las cantidades (*Count*) de usuarios que fueron atendidos, en dicho caso para los pacientes color **Verde**, el tiempo medio (*Mean*) de atención que se asemeja en un 95% con el de la distribución normal. También el tiempo mínimo (*Min*) y máximo (*Max*) que también coinciden en un 87% y 95% respectivamente con el asignado en la distribución. Por último, se brinda información al respecto de la desviación (*Deviation*) y el intervalo de confianza (*Mean confidence*). Se entiende que los resultados son correctos y se verifica el funcionamiento de los estudios en el tomógrafo (Figura 6-18).

timeMeasureEnd8	
root.timeMeasureEnd8: TimeMeasureEnd	
in:	183
out:	183
Time distribution:	
Count	183
Mean	57.017
Min	23.272
Max	114.788
Deviation	20.962
Mean confidence	3.037

Figura 6-18: Tiempo de atención tomógrafo

6.1.5.3 Verificación de tiempo de atención de los Rayos X

Para este caso el tiempo asignado es de una distribución Triangular (20, 40, 120) en minutos. Con este modelo, se obtienen los resultados de la Figura 6-19, se obtuvo un resultado que se asemeja en un 99% ya que la media de dicha distribución es de 60 minutos y en la experimentación se obtuvo 59.8 de media. Luego para el mínimo y el máximo un nivel de coincidencia de 89% y 96% con 20 y 120 minutos respectivamente. Se entiende que los resultados son correctos y se verifica el funcionamiento de los estudios en los Rayos X.

```

timeMeasureEnd9
root.timeMeasureEnd9: TimeMeasureEnd
  in:          354
  out:         354
Time distribution:
Count      354
Mean       59.862
Min        22.452
Max        115.48
Deviation   20.191
Mean confidence 2.103

```

Figura 6-19: Tiempo de atención rayos X

6.1.5.4 Verificación de tiempo de atención de la Ecografía

Para este caso el tiempo de la distribución Triangular (20, 40, 120) en minutos. Se pueden visualizar los resultados la Figura 6-20. Para la media se obtuvo un resultado que coincide en un 95%, (63.1 minutos en comparación a 60 minutos), luego para el mínimo y el máximo un nivel de coincidencia de 90% y 94% respectivamente. Se entiende que los resultados son correctos y se verifica el funcionamiento de los estudios de Ecografía.

```

timeMeasureEnd10
root.timeMeasureEnd10: TimeMeasureEnd
  in:          204
  out:         204
Time distribution:
Count      204
Mean       63.107
Min        22.16
Max        113.664
Deviation   21.197
Mean confidence 2.909

```

Figura 6-20: Tiempo de atención ecografía

6.1.5.5 Verificación de tiempo de atención en el sillón

Para este caso el tiempo de la distribución Triangular (10, 15, 20) en minutos. Los resultados se muestran en la Figura 6-21. Para este caso al ser una distribución triangular centrada, tanto la media como el mínimo y el máximo se muestra que coinciden con el de la distribución. Por lo que se da como satisfecha la verificación del tiempo de atención en los sillones.

```

timeMeasureEnd8
root.timeMeasureEnd8: TimeMeasureEnd
  in:          1,435
  out:         1,435
Time distribution:
Count    1,435
Mean     15.028
Min      10.223
Max      19.854
Deviation      2.068
Mean confidence 0.107

```

Figura 6-21: Tiempo de atención sillones

6.1.5.6 Verificación de tiempo de atención en el box

Para este caso el tiempo de la distribución Triangular (10, 15, 20) en minutos. Se muestran los resultados en la Figura 6-22. Por lo que se da como satisfecha la verificación del tiempo de atención en los boxes.

```

timeMeasureEnd8
root.timeMeasureEnd8: TimeMeasureEnd
  in:          839
  out:         839
Time distribution:
Count    839
Mean     14.951
Min      10.174
Max      19.906
Deviation      2.029
Mean confidence 0.137

```

Figura 6-22: Tiempo de atención box

6.1.5.7 Verificación de tiempo de atención en la sala de cuidados intermedios

Para este caso el tiempo de la distribución Triangular (20, 30, 40) en horas. Se obtienen los resultados de la Figura 6-23. Tener en cuenta que los resultados de la figura se muestran en minutos por ser la unidad del modelo. Es decir que la media obtenida fue de 30.4 h, luego 22,3 h y 37.2 h para la mínima y la máxima. Se entiende satisfecha dicha prueba de verificación.

```

timeMeasureEnd8
root.timeMeasureEnd8: TimeMeasureEnd
  in:          23
  out:         23
Time distribution:
Count    23
Mean     1,824.745
Min      1,334.274
Max      2,231.36
Deviation      308.779
Mean confidence 132.633

```

Figura 6-23: Tiempo de atención cuidados intermedios

6.2 PRUEBAS DE SENSIBILIDAD

Las pruebas de sensibilidad permiten verificar si el sistema responde según lo previsto a cambios abruptos en las variables ingresadas. En estos casos se generan distintas variaciones en los parámetros del sistema y verificar que se comporta como lo es esperado (Sommerville, 2016).

6.2.1 Prueba de sensibilidad con el 50% menos de recursos humanos

Se evaluó el comportamiento del simulador bajo la restricción de reducir a la mitad la cantidad de recursos humanos disponibles, y el objetivo principal es verificar si el sistema puede mantenerse en funcionamiento sin interrupciones durante al menos 30 días.

Durante esta prueba, se realizaron reiteradas simulaciones variando el valor semilla que se ingresa al sistema y ajustando la cantidad de recursos humanos a la mitad, sea cual sea su origen (médicos, enfermeros, cirujanos, especialistas). Se observa que el flujo de pacientes se mantiene, aunque se generan colas de espera más grandes, llegando en algunos puntos del sistema a superar las 100 personas en espera.

Dentro de las correcciones realizadas gracias a esta prueba, está retirar la restricción a todas las colas que tienen valor máximo de 100 personas. Estas correcciones permitieron que el modelo pueda correr sin interrupciones por 30 días, y a su vez refleje mejor la realidad, teniendo en cuenta que la prueba realizada es un escenario posible si es que se reduce abruptamente el presupuesto de la sala u ocurre un accidente.

6.2.2 Prueba de sensibilidad con el 50% menos de recursos fijos

En esta prueba se verifica el correcto funcionamiento del sistema si se reducen en un 50% los recursos fijos, como camillas y sillones. Los resultados de la prueba mostraron que, si bien se generaban filas de espera más largas de las generadas en el caso base, el sistema puede seguir ejecutándose sin obstáculos significativos.

Se da como satisffecha la prueba, ya que el sistema puede seguir funcionando sin interrupción alguna.

6.2.3 Aumento de la tasa de arribo

En esta prueba se quiere estudiar si el comportamiento del sistema es el esperado si se aumenta la tasa de arribo.

Se aumenta en un 25% la tasa de arribo de los pacientes. Luego de correr el sistema reiteradas veces variando el valor semilla, se obtuvo un aumento en la cantidad de ingresos en promedio del 36%, esto se debe a que los ingresos no dependen únicamente de la tasa de arribo, sino que también dependen de la distribución de probabilidad utilizada.

La prueba se da por satisffecha ya que el sistema responde correctamente a lo previsto, es decir, al aumentar la tasa de arribo, aumenta la cantidad de ingresos.

6.2.4 Reducción de recursos humanos a una unidad

En esta prueba, se redujo la cantidad de médicos a una unidad, lo que llevó a la esperada saturación de las colas de espera. Después de realizar varias ejecuciones del modelo, se observó que constantemente la simulación se interrumpía antes de una semana debido a que el número de personas en la fila de espera superaba el límite establecido por cola de 100 personas.

Debido a la escasez de personal médico, la fila de espera va aumentando rápidamente sin poder ser atendida de manera normal, superando el límite de 100 personas por cola. Esta situación genera un escenario colapso en el sistema, lo que lleva a la interrupción de la simulación antes de llegar a una semana, es decir que el sistema no permite continuar con la atención a los pacientes. Dicho colapso es debido a que el límite para la cola del sistema era de 100 pacientes y al llegar al 101 ya no se cuenta con más espacio para ser atendido. El comportamiento verifica el funcionamiento del sistema ya que se espera que si se tiene una cola de tal magnitud la emergencia no pueda cumplir con sus funciones correctamente.

6.3 PRUEBAS DE VALIDACIÓN

Las pruebas de validación, por su parte, son una forma de evaluar si un modelo es aplicable a la situación real. En este caso, se propone correr el modelo reiteradas veces, y realizar un análisis de los resultados obtenidos. La razón del proceso de validación es asegurarse que el sistema cumple con las especificaciones del cliente (Sommerville, 2016). Es por lo que, el enfoque de validación a utilizar en este estudio es "Validar la Salida del Modelo de Simulación General" (Law, 2013). El objetivo principal de esta validación es asegurarse de que los datos de salida generados por el modelo de simulación en distintos casos se asemejen estrechamente a los datos del sistema real.

Este proceso implica comparar los datos de salida del modelo de simulación en determinados casos, con los datos recopilados del sistema existente. Si los dos conjuntos de datos muestran una estrecha similitud, se considera que el modelo del sistema existente es válido, lo que indica que representa de manera precisa el sistema real.

6.3.1 Prueba de Validación de tiempos de Triage

En esta prueba se quiere validar el tiempo de atención en el Triage. Se toman los datos de entrada brindados por la contraparte del hospital, en donde el tiempo de atención para el Triage es de cinco minutos.

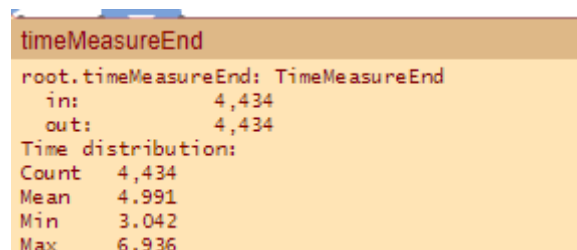


Figura 6-24: Tiempo de atención Triage

En la figura Figura 6-24 se observan los datos obtenidos para el Triage. Allí se puede visualizar que el tiempo medio de realización del Triage es 4.991 minutos, por lo que se da por válida la prueba.

6.3.2 Prueba de Validación de flujo de pacientes Verdes

Se quiere validar el porcentaje de pacientes **Verdes** que visitan el tomógrafo, rayos X o ecógrafo. En la realidad, el 11.72% de los pacientes **Verdes** van al tomógrafo, 25.53% tienen que realizarse estudios de rayos X y el 14.44% tienen que realizarse ecografías. Los resultados obtenidos fueron los de la Figura 6-25. Es decir, un 13.63% con pase al tomógrafo, 26.74% a estudios de rayos X y 14.66% a estudios de ecografía. En todos los casos, la diferencia con la realidad es menor al 2%, lo que se considera aceptable y con esto se da por válida la prueba.

```
selectOutput7
root.selectOutput7: selectOutput5
in:          2,442
out1:        333
out2:        653
out3:        358
out4:        1,098
out5:        0
```

Figura 6-25: Flujo de pacientes Verdes

6.3.3 Prueba de validación de arribo de pacientes

Se quiere validar la cantidad de arribos de pacientes por día y la división de clasificados.

Para validar esto, se compara con los datos brindados por la contraparte (véase la fuente de datos en la Sección 3). En la Figura 6-26 se grafica la cantidad de pacientes que entran por día. Es importante aclarar que se observan picos de llegada de pacientes **Rojos**, esto no son valores correctos ya que se deben a que dentro de la atención oftalmológica se les completa el Triage en **Rojo** a casos que no son de tal gravedad, ya que esto genera una impresión instantánea de los datos del paciente y agiliza la consulta.

Para los pacientes **Azules**, se tiene un arribo de 1.5 pacientes por día, para los **Verdes** 81.8 promedio de arribos por día, para los **Amarillos** 49.8, **Naranjas** 10.9 arribos por día y para los **Rojos** 2.2 arribos por día.

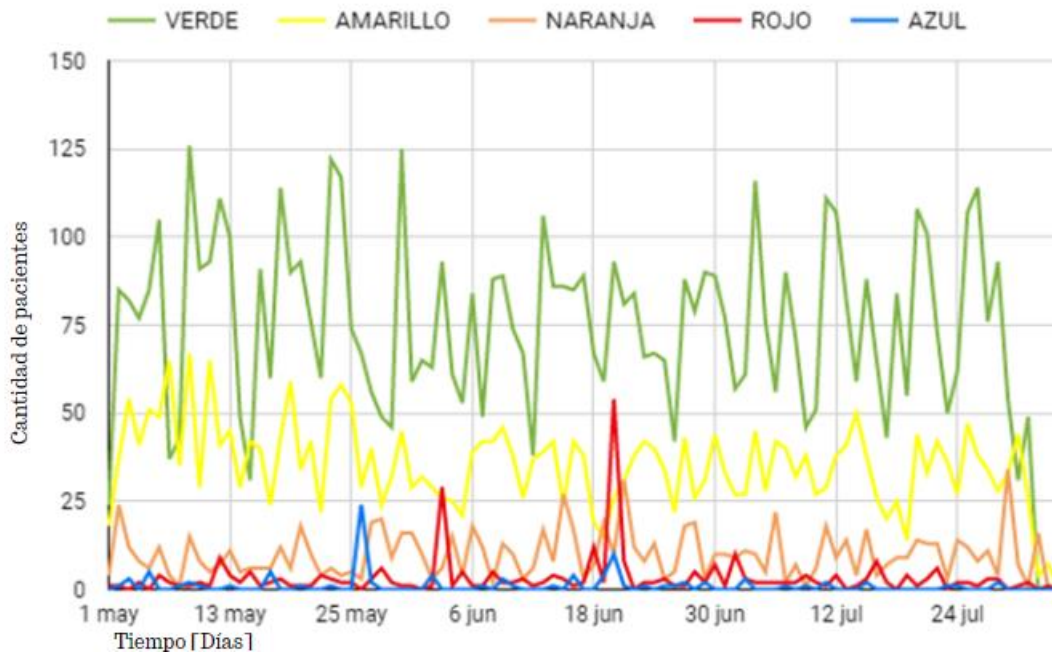


Figura 6-26: Arribo de pacientes clasificados, datos reales

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observa los datos de salida de Anylogic. La media de los **Azules** es de 1.3 arribos por día, para los **Verdes** 82.2 arribos por día, los **Amarillos** 51.3 arribos por día, los **Naranjas** 10.4 arribos por día y para los **Rojos** 2.1 arribos por día. Los valores varían en menos de un 15% con la realidad, lo que se entiende aceptable y se da por validada la prueba.

6.4 CONCLUSIONES DE LA VALIDACIÓN Y VERIFICACIÓN

Luego de realizar las pruebas de Validación y Verificación se concluye que el sistema fue validado y verificado. Dicho análisis se puede notar principalmente en las pruebas de sensibilidad en el sistema.

Validar no solo implica aceptar el modelo para la utilización del sistema propuesto, sino que también es el sustento de la confiabilidad del trabajo y de la seguridad con la que se pueden utilizar los datos para la toma de decisiones (Law, 2013). Se destaca que, si se quiere ampliar el alcance de la validación del modelo, se debe tener en cuenta los siguientes puntos.

Actualmente la sala de emergencias no tiene una recopilación de datos computarizada, rigurosa y sistemática de la información de los pacientes en el día a día, lo que acota los datos que se tienen disponibles. Esta falta disminuye en gran medida el espectro de variables que se pueden validar en el modelo, ya que no se tiene con qué comparar las salidas del modelo, lo cual es la mayor problemática del actual estudio de validación. Si se pone foco en generar una recopilación de información, se puede contar con una base de datos más sólida y completa que la actual, y con esto generar más estudios comparativos.

Partiendo de la base de que en un futuro se logran recopilar los datos necesarios para realizar las comparativas, se deberían agregar como prioritario pruebas que validen los tiempos de la duración de las consultas médicas, el tiempo de permanencia de los pacientes en la sala según el tipo de clasificación y el tiempo de permanencia de pacientes en el sector de cuidados intensivos.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, con estos cambios se podrá asegurar que el modelo queda validado en mejor medida y con esto, garantizará una mayor similitud entre los valores que proporcione y la realidad.

7 PRUEBAS DE EXPERIMENTACIÓN

En esta sección se presenta el análisis de sensibilidad, que busca encontrar las configuraciones de parámetros en la que los tiempos de estadía de los pacientes se vean reducidos lo mayor posible.

Luego de verificar y validar el modelado, se llega a un modelo que no reporta errores en las pruebas realizadas, y se adapta correctamente a los valores de entrada que se introdujeron. Posterior a esto, se realiza un análisis de distintos escenarios y la optimización del modelo, para poder obtener resultados que lleven a conclusiones de configuraciones con un menor tiempo de permanencia de los pacientes. Para todos estos escenarios, se dividió el modelo en secciones para poder tomar los siguientes controles de tiempo:

- Tiempo de Permanencia Triage: Tiempo medio de una corrida de un mes desde el inicio de la atención en la recepción hasta el fin de la atención en la sala de Triage.
- Tiempo de Permanencia Pacientes **Azules**: Tiempo desde el fin de la atención en la sala de Triage hasta el fin de la última actividad del paciente, es decir, cuando sale de la emergencia, para los pacientes **Azules**. Mismo concepto aplica para el resto de la clasificación de los pacientes (**Verdes 1 y 2, Amarillos 1 y 2, Naranja 1 y 2, Rojos**).

7.1 RESULTADOS CASO BASE

Antes de realizar modificaciones a la configuración actual de la sala de emergencias, se realizan corridas con los parámetros de entrada mencionados en la Sección 3. El caso base permite obtener los tiempos de permanencia de referencia, es decir, que al realizar modificaciones en los parámetros de entrada se puede analizar el comportamiento del sistema comparándolo con el tiempo de permanencia actual.

El modelo se corre un total de 11 veces, variando el valor semilla, con los parámetros de entrada base, para 30 días de funcionamiento. Esta cantidad de tiempo es elegida debido a que la base de datos con la que se obtuvo los parámetros de entrada es de un período de 30 días.

Las medias de los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 7-1. Estos valores se contrastan con el Tiempo de Permanencia hasta el Triage relevado, que era de 51 minutos, con el promedio resultante de 65 minutos tras realizar 11 simulaciones consecutivas. Para los pacientes **Naranjas 2 y Rojos** no corresponde sumar el tiempo de permanencia medio del Triage ya que son atendidos de forma inmediata sin pasar por la clasificación. Luego un enfermero los clasifica para poder ingresarlos al sistema.

Sobre los tiempos que se observan en la Tabla 7-1, los pacientes **Verdes 2** son los que tienen el mayor tiempo de permanencia. Esto es debido a que son pacientes con poca prioridad y comparten recursos con pacientes del tipo **Amarillo 1 y Naranjas 1**.

Tabla 7-1: Tiempos permanencia caso base

Tiempo medio de permanencia por clasificación de pacientes [min]								
Clasificación de paciente	Triage	Azules/Verdes1	Verdes2	Amarillos1	Amarillos2	Naranjas1	Naranjas2	Rojos
Caso base	65.1	44.9	288.4	139.3	53	81.2	1128.2	106.5
Caso base considerando el tiempo del Triage	N/A	110	353.5	204.4	118.1	146.3	N/A	N/A

7.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En la experimentación, se realizaron pruebas de configuraciones distintas a la del caso base, para poder identificar escenarios que mejoren el tiempo de espera de los pacientes. Específicamente se varió la cantidad de salas de Triage, Consultorios, camas y sillones, RRHH, y combinación de los recursos anteriores. Esto es debido a que se quería estudiar el impacto de variar los recursos utilizados por los pacientes, para encontrar una configuración de parámetros que mejore el tiempo de permanencia. Se quiere destacar que no se considera el costo que implicara realizar cada uno de los escenarios.

7.2.1 Estudio de capacidad del Triage

Análisis considerando un Triage más

En esta prueba lo que se busca es realizar simulaciones del sistema de la emergencia del HC variando la capacidad de la sala de Triage. La mayoría de los pacientes utilizan este recurso debido a que sirve para poder clasificarlos, exceptuando a los pacientes color **Rojo** que visiblemente se conoce su estado de gravedad y se les realiza el Triage cuando ya fueron atendidos por el personal médico.

La primera opción que se tuvo en cuenta fue la de agregar un salón más de Triage, con las mismas semillas que para el caso base, corriendo el sistema un total de 10 veces. Los tiempos de esta sección se vieron disminuidos obteniendo una media de 20.3 minutos de espera y atención de Triage. En promedio de diez pruebas el tiempo de atención del Triage se redujo un 68.2%.

Con este cambio en el sistema se nota que el resto de los tiempos aumentaron el tiempo de permanencia total de los pacientes, esto se debe a que el flujo de entrada al tener dos Triage se ve aumentado. El tiempo de los pacientes **Verdes 2** en promedio pasa a ser de 419.9 min (35.8% más que el original), **Amarillos 1** 167.3 min (18.1% -), **Amarillos 2**, 74.1 min (37.2%-), **Naranjas 1** 103.1 min (29.5%-), se puede notar con mayor detalle en la Tabla 7-2. Para los pacientes **Naranjas 2** y **Rojos** no hubo variaciones significativas.

Tabla 7-2: Tiempo de permanencia, caso:1 Triage más

Tiempo medio de permanencia por clasificación de pacientes [min]								
Clasificación de paciente	Triage	Azules/Verdes1	Verdes2	Amarillos 1	Amarillos 2	Naranjas 1	Naranjas 2	Rojos
Caso base	65.1	44.9	288.4	139.3	53	81.2	1128.2	106.5
Caso base considerando tiempo de Triage	N/A	110	353.5	204.4	118.1	146.3	N/A	N/A
Caso un Triage más	20.7	49.9	394.2	146.6	53.4	82.4	1134.8	107.5

Análisis considerando un Triage más de 12:00 a 18:00 h.

Prosiguiendo, se analizan los tiempos de permanencia considerando agregar una sala más de Triage solo para el turno de enfermería, en el cual llega la mayor cantidad de pacientes. Este horario es el de 12:00 h a 18:00 h, pasando a tener dos salas de Triage.

En promedio de diez pruebas el tiempo de atención del Triage se redujo un 56.8%. El tiempo de los pacientes **Verdes 2** en promedio pasa a ser de 406.3 min (14.9% más que el original), **Amarillos 1** 175.8 min (13.9% -), **Amarillos 2**, 82.4 min (30.2%-), **Naranjas 1** 110.7 min (24.3%). En la Tabla 7-3 se puede notar los resultados obtenidos.

En la Figura 7-1 se puede observar la comparación de los tiempos. Para el único caso en el que agregando más capacidad el tiempo de permanencia medio total aumenta, es para los pacientes color **Verde**. Esto se justificaría ya que al tener un mayor flujo de pacientes ya clasificados se le da prioridad a ser atendidos a los pacientes más críticos.

Tiempo de permanencia, análisis de variación de Triage

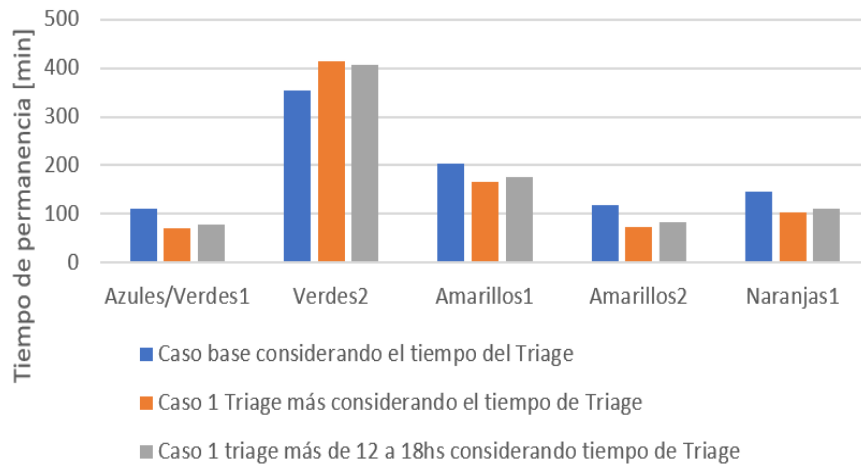


Figura 7-1: Tiempo de permanencia por Control de Tiempo para Triage

Tabla 7-3: Tiempo de permanencia, caso: 1 triage más de 12 a 18 h

Tiempo medio de permanencia por clasificación de pacientes [min]								
Clasificación de paciente	Triage	Azules/ Verdes1	Verdes	Amarillos 1	Amarillos 2	Naranjas 1	Naranjas 2	Rojos
Caso base	65.1	44.9	288.4	139.3	53	81.2	1128.2	106.5
Caso base considerando tiempo de Triage	N/A	110	353.5	204.4	118.1	146.3	N/A	N/A
Caso 1 Triage más de 12 a 18hs	28.1	51.5	378.2	147.7	54.3	82.6	1087.9	104.8
Caso 1 Triage más de 12 a 18hs considerando tiempo de Triage	N/A	79.6	406.3	175.8	82.4	110.7	N/A	N/A

7.2.2 Estudio de capacidad de Boxes y Sillones

En esta sección se estudia la sensibilidad del modelado al aumentar la cantidad de camas disponibles en boxes o sillones. Los resultados obtenidos no tuvieron mucha variabilidad con respecto a los de la Tabla 7-1.

Para el caso en el que se agrega una cama más en un box los resultados obtenidos fueron los que se muestran en la Tabla 7-4.

Tabla 7-4: Tiempo de permanencia, caso: 1 cama más

Tiempo medio de permanencia por clasificación de pacientes [min]								
Clasificación de paciente	Triage	Azules/ Verdes 1	Verdes2	Amarillos 1	Amarillos 2	Naranjas 1	Naranjas 2	Rojos
Caso: 1 cama más	69.3	45.1	278.9	143.9	56.7	81.2	1170.1	105
Caso: 1 cama más, considerando tiempo de Triage	N/A	114.4	348.2	213.2	126	150.5	N/A	N/A

Luego se analizaron los tiempos para cuando se aumenta la capacidad de los sillones en una unidad extra. Los tiempos obtenidos son los de la Tabla 7-5.

Tabla 7-5: Tiempo de permanencia, análisis box

Tiempo medio de permanencia por clasificación de pacientes [min]								
Clasificación de paciente	Triage	Azules/ Verdes1	Verdes2	Amarillos 1	Amarillos 2	Naranjas 1	Naranjas 2	Rojos
Caso: 1 box más	71	45.1	278.9	143.9	56.7	81.2	1170.1	105
Caso: 1 box más, considerando tiempo de Triage	N/A	114.4	348.2	213.2	126	150.5	N/A	N/A

En la Figura 7-2 se observa que las variaciones de este análisis con el caso base no son relevantes para realizar modificaciones ya que los sillones o las camas no son recursos restrictivos para este tipo de configuración. Se entiende que las leves diferencias son en gran parte por la aleatoriedad en cada corrida.

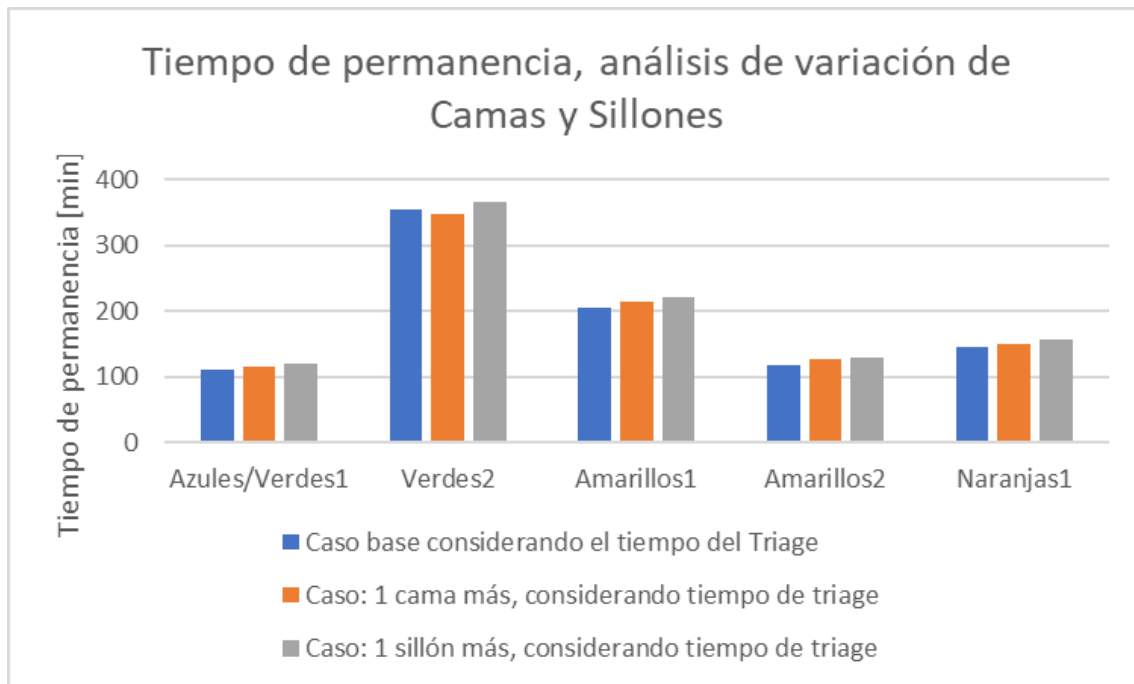


Figura 7-2:Tiempo de permanencia, análisis Camas y Sillones

7.2.3 Estudio de la capacidad de Consultorios

Al realizar las corridas para el caso base, se realiza un análisis de la cantidad de consultorios, los cuales son utilizados por pacientes **Verdes**, **Amarillos** y **Naranjas 1**, luego de ser clasificados en el Triage. La cantidad de consultorios del caso base es de seis, por lo que se decidió analizar el comportamiento del sistema considerando variaciones de dicho número. Los tiempos obtenidos para el caso de un consultorio menos, se observan en la Tabla 7-6. Se obtienen resultados muy similares a los del caso base, pero para los pacientes Verdes 2 se cuenta con una mejora del 8% del tiempo de permanencia.

Tabla 7-6: Tiempo de permanencia, caso: 1 consultorio menos

Tiempo medio de permanencia por clasificación de pacientes [min]								
Clasificación de paciente	Triage	Azules/Verdes1	Verdes2	Amarillos 1	Amarillos 2	Naranjas 1	Naranjas 2	Rojos
Caso: 1 consultorio menos	72.7	46.2	293.1	149.5	57.2	84.6	1111.2	105.2
Caso: 1 consultorio menos, considerando tiempo de Triage	N/A	118.9	365.8	222.2	129.9	157.3	N/A	N/A

Luego, se realiza el mismo análisis considerando dos consultorios menos que el caso base, teniendo un total de 4 consultorios para atender. En la Tabla 7-7 se ven los resultados. Con respecto al caso base, empeoran los tiempos de los pacientes tipo **Verde 2** en un 13% y para los **Amarillos 1** en un 6%. Esto es debido a que los pacientes con menos prioridad van a permanecer más tiempo en filas de espera ya que hay menos recursos disponibles.

Tabla 7-7: Tiempo de permanencia, caso: 2 consultorios menos.

Tiempo medio de permanencia por clasificación de pacientes [min]								
Clasificación de paciente	Triage	Azules/Verdes1	Verdes2	Amarillos 1	Amarillos 2	Naranjas 1	Naranjas 2	Rojos
Caso: 2 consultorios menos	71.5	43.5	328.1	144.5	54.6	82.2	1130.1	106.7
Caso: 2 consultorios menos, considerando tiempo de Triage	N/A	115	399.6	216	126.1	153.7	N/A	N/A

Luego, también se analiza cómo afectan los tiempos de permanencia para el caso en el que se agregue un consultorio más. En donde los resultados obtenidos no tuvieron mayor impacto, exceptuando una mejora de un 5% en el tiempo de permanencia para los pacientes **Verdes 2**. Dichos tiempos son los que se muestran en la Tabla 7-8.

Tabla 7-8: Tiempo de permanencia, caso: 1 consultorios más

Tiempo medio de permanencia por clasificación de pacientes [min]								
Clasificación de paciente	Triage	Azules/Verdes1	Verdes2	Amarillos 1	Amarillos 2	Naranjas 1	Naranjas 2	Rojos
Caso: 1 consultorio más	64.8	44.6	271.6	136.5	53.1	81.9	1121.4	105.4
Caso: 1 consultorio más, considerando tiempo de Triage	N/A	109.4	336.4	201.3	117.9	146.7	N/A	N/A

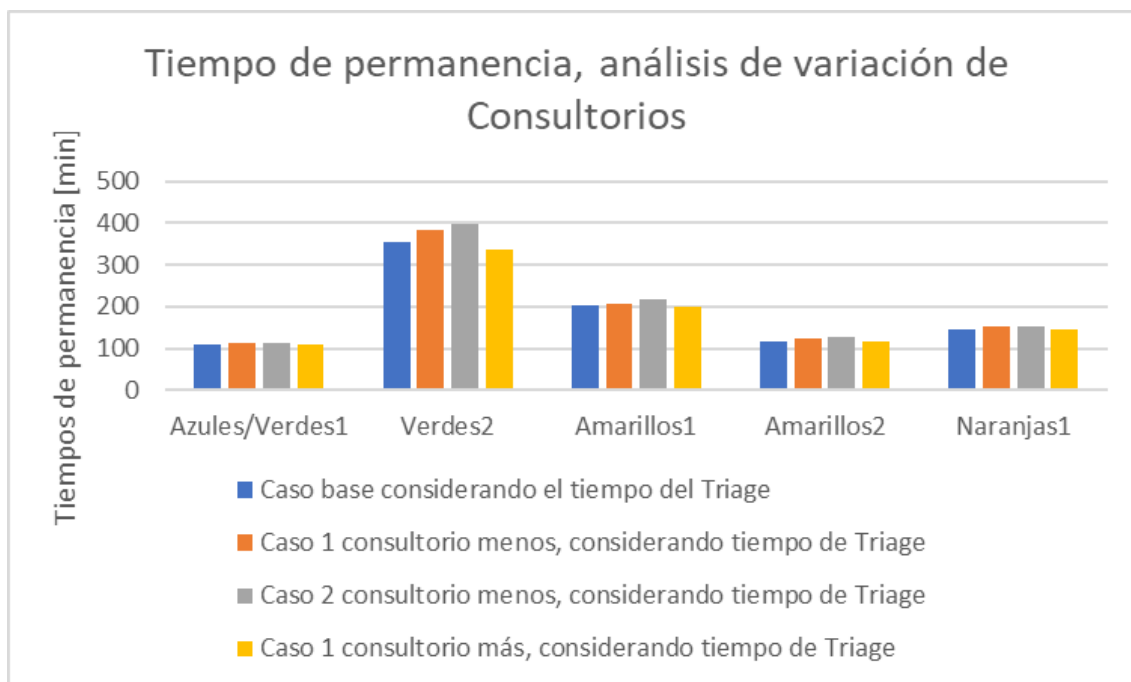


Figura 7-3: Tiempo de permanencia, análisis consultorio

Los resultados de la Figura 7-3 muestran que al agregar un consultorio más, el tiempo de permanencia de los pacientes **Verdes** se ve disminuido. Esto se debe a que el consultorio es compartido por pacientes **Verdes, Amarillos y Naranjas**, al ser el de menos prioridad, con menos recursos es el tipo de pacientes que tiene que esperar más para permitir que pacientes más graves sean atendidos. Al disminuir la cantidad de consultorios también vemos variaciones negativas con el tiempo de permanencia de los pacientes **Verdes 2**, ya que se ve aumentado. Se nota que el disminuir la cantidad de consultorios tiene un mayor impacto en un tipo de pacientes clasificado como leve, por lo que se entiende que se podría utilizar dichas salas para agregar más salas de Triage.

7.2.4 Estudio de cantidad de RR.HH.

Dentro de los análisis de sensibilidad, se realizó el estudio de cómo impactan los tiempos de permanencia al variar la cantidad de enfermeros, médicos e imagenólogos.

Los resultados obtenidos para la variación de estos recursos fueron que no se logra una reducción significativa del tiempo de permanencia para ningún tipo de paciente. Esto se debe a que los RR.HH. no son el cuello de botella del caso base de la emergencia del HC.

Para el caso de la variación de los médicos se parte de la base de que se tiene 8 médicos generales disponibles y se varió en una unidad dicho recurso, sin obtener cambios significativos. Para los enfermeros el caso base contiene un total de 24 enfermeros disponibles en cada turno. Se realiza el análisis de sensibilidad en el modelo al variar en una unidad ese número y tampoco se encuentra sensibilidad en los resultados de tiempo de permanencia en comparación con el caso base. El resultado obtenido para la variación de imagenólogos es similar al de médicos y enfermeros, y no se encontraron variaciones significativas en el tiempo de permanencia medio de los pacientes.

7.2.5 Estudio de la cantidad de Triage, Enfermeros y Médicos

En esta sección se realiza el análisis de sensibilidad en el modelo al combinar variaciones en el Triage, la cantidad de Enfermeros y de Médicos.

El primer caso estudiado fue el de agregar una sala de Triage y un médico más. Se quiere analizar si aumentando la capacidad de clasificación de los pacientes y al aumentar el personal médico se tienen mejoras en los tiempos, en comparación a agregar un horario extra del Triage.

Tabla 7-9: Tiempo de permanencia, variación triage y médicos

Tiempo medio de permanencia por clasificación de pacientes [min]								
Clasificación de paciente	Triage	Azules/ Verdes1	Verdes2	Amarillos 1	Amarillos 2	Naranjas 1	Naranjas 2	Rojos
Caso 1 Triage y 1 médico más	19.4	52.3	312.9	138.6	53.1	82.5	1141.1	106.4
Caso 1 Triage y 1 médico más, considerando tiempo de Triage	N/A	71.7	332.3	158	72.5	101.9	N/A	N/A
Caso 1 Triage y 2 médico más	20.2	49.6	274.5	140.7	53.1	81.8	1124.1	106.2
Caso 1 Triage y 2 médico más, considerando tiempo de Triage	N/A	69.8	294.7	160.9	73.3	102	N/A	N/A

El resultado obtenido muestra una mejora de atención para los pacientes **Verdes 2**, por lo que el modificar dichos recursos implicaría menor tiempo de espera para pacientes leves. Comparando los **resultados como se muestra** en la Figura 7-4 con el tiempo de agregar un consultorio más de triage, para los **Verdes 2** al agregar un médico mejora el tiempo de permanencia en un 19% y al agregar 2 médicos en un 29%.

7.2.6 Estudio de la cantidad de Triage, de médicos y de Rayos X

En esta sección se analiza el escenario en el cual se agrega un Triage más de 12.00 a 18.00 h, un **médico y un** equipo de RayosX más. Esto es debido a que se identifica que son los recursos que cuentan con mayor ocupación. Los resultados obtenidos son los que se ven en la

En la Figura 7-5 se puede ver la comparación de los tiempos de permanencia en función del caso base. Para todos los colores se ve una mejora, los **Azules/Verdes 1** mejoran en un 29% el tiempo de permanencia, los **Verdes 2** en un 46%, los **Amarillos 1** en un 22%, los **Amarillos 2** en un 31% y los **Naranjas1** en un 26%. Se entiende que es un escenario favorable para la mejora de los tiempos, pero que no se está teniendo en cuenta la inversión necesaria para generar otra sala de RayosX.

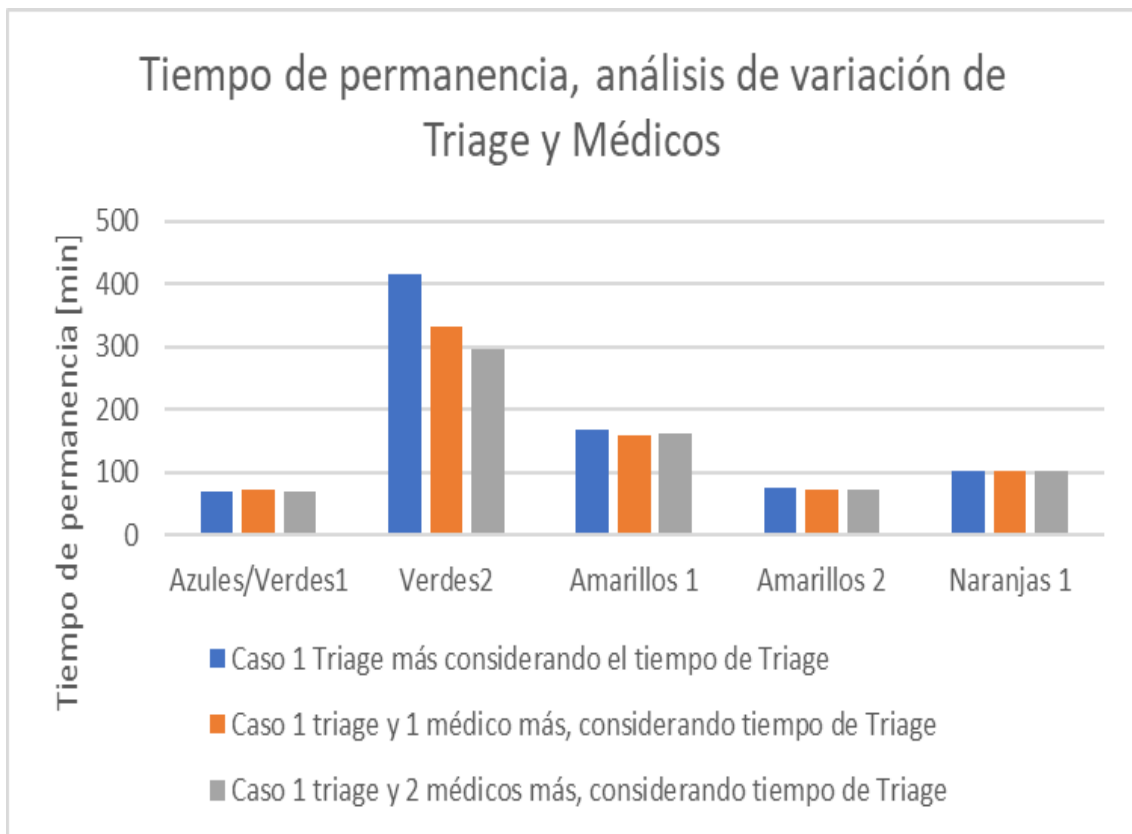


Figura 7-4: Tiempo de permanencia, variación triage, médicos y enfermeros

Tabla 7-10: Tiempo de permanencia: Triage, de médicos y de Rayos X

Tiempo medio de permanencia por clasificación de pacientes [min]								
Clasificación de paciente	Triage	Azules/Verdes1	Verdes 2	Amarillos 1	Amarillos 2	Naranjas 1	Naranjas 2	Rojos
Caso base	65.1	44.9	288.4	139.3	53	81.2	1128.2	106.5
Caso base considerando el tiempo del Triage	N/A	110	353.5	204.4	118.1	146.3	N/A	N/A
Caso 1 Triage 12.00 a 18.00 1 RayosX y 2 médicos más	27.1	51.2	162.4	132	53.6	81.4	1097,8	106.7
Caso 1 Triage 12.00 a 18.00y RaryosX y 2 médicos más, considerando tiempo de Triage	N/A	78.3	189.5	159.1	80.7	108.5	N/A	N/A

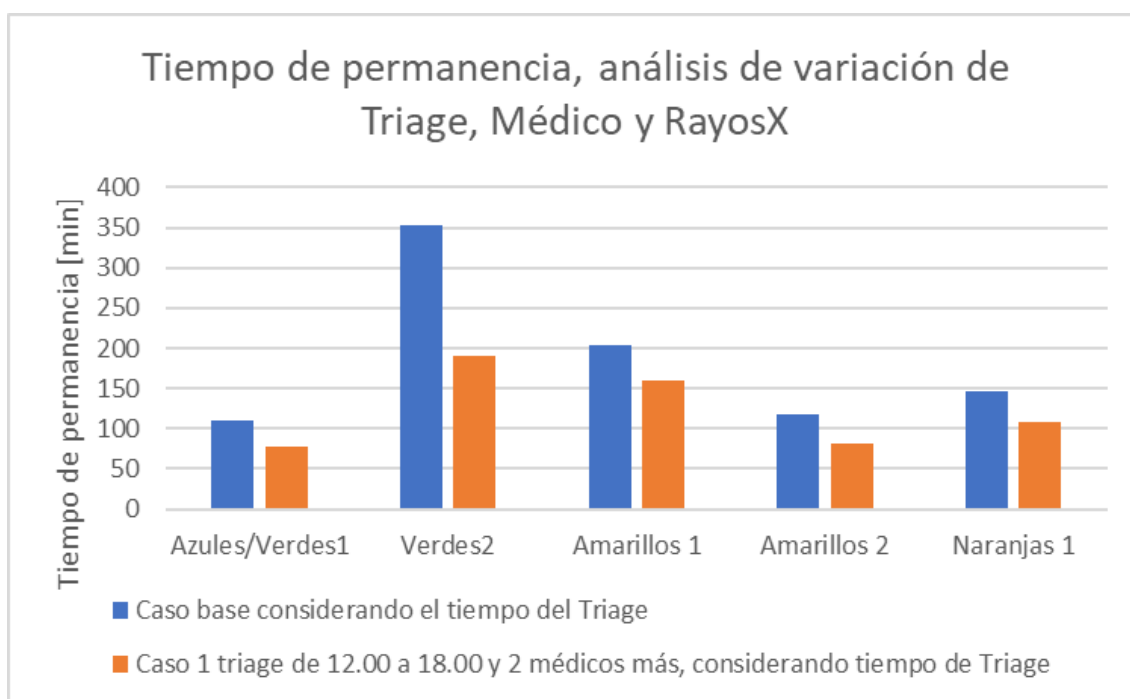


Figura 7-5: Tiempo de permanencia: análisis, 1 Triage de 12.00 a 18.00, 2 médicos y 1 Rayos X más

7.2.7 Estudio de la cantidad de Rayos X, Ecografía y Tomografías

En este estudio, se pudo identificar la restricción más importante del sistema según la configuración actual de recursos de la emergencia del HC: la sala de Rayos X. Igualmente, en cualquiera de los tres sectores, al aumentar en una unidad las salas se logran disminuciones significativas en los tiempos de espera.

Tabla 7-11: Tiempo de permanencia por clasificación de pacientes, caso: 1 RayosX más

Tiempo medio de permanencia por clasificación de pacientes [min]								
Clasificación de paciente	Triage	Azules/ Verdes1	Verdes2	Amarillos 1	Amarillos 2	Naranjas 1	Naranjas 2	Rojos
Caso base	65.1	44.9	288.4	139.3	53	81.2	1128.2	106.5
Caso base considerando tiempo de Triage	N/A	110	35.5	204.4	118.1	146.3	N/A	N/A
Caso 1 RayosX más	63.2	39.2	118	114.2	53.4	77.1	1153.6	107.4
Caso 1 RayosX más considerando Triage	N/A	102.4	181.2	177.4	116.6	140.3	N/A	N/A

Tabla 7-12: Tiempo de permanencia por clasificación de pacientes, caso: 1 tomógrafo más

Tiempo medio de permanencia por clasificación de pacientes [min]								
Clasificación de paciente	Triage	Azules	Verdes	Amarillos 1	Amarillos 2	Naranjas 1	Naranjas 2	Rojos
Caso base	65.1	44.9	288.4	139.3	53	81.2	1128.2	106.5
Caso base considerando tiempo de Triage	N/A	110	35.5	204.4	118.1	146.3	N/A	N/A
Caso 1 Tomógrafo más	67.2	39.3	164.2	117	53.4	78.1	1040.5	111.1
Caso 1 Tomógrafo más considerando Triage	N/A	106.5	231.4	184.2	120.6	145.3	N/A	N/A

Tabla 7-13: Tiempo de permanencia por clasificación de pacientes, caso: 1 ecógrafo más

Tiempo medio de permanencia por clasificación de pacientes [min]								
Clasificación de paciente	Triage	Azules	Verdes	Amarillos 1	Amarillos 2	Naranjas 1	Naranjas 2	Rojos
Caso base	65.1	44.9	288.4	139.3	53	81.2	1128.2	106.5
Caso base considerando tiempo de Triage	N/A	110	35.5	204.4	118.1	146.3	N/A	N/A
Caso 1 Ecógrafo más	68.2	38.8	178.6	122.4	54.4	78.6	1070.7	108.1
Caso 1 Ecógrafo más considerando Triage	N/A	107	246.8	190.6	122.6	146.8	N/A	N/A

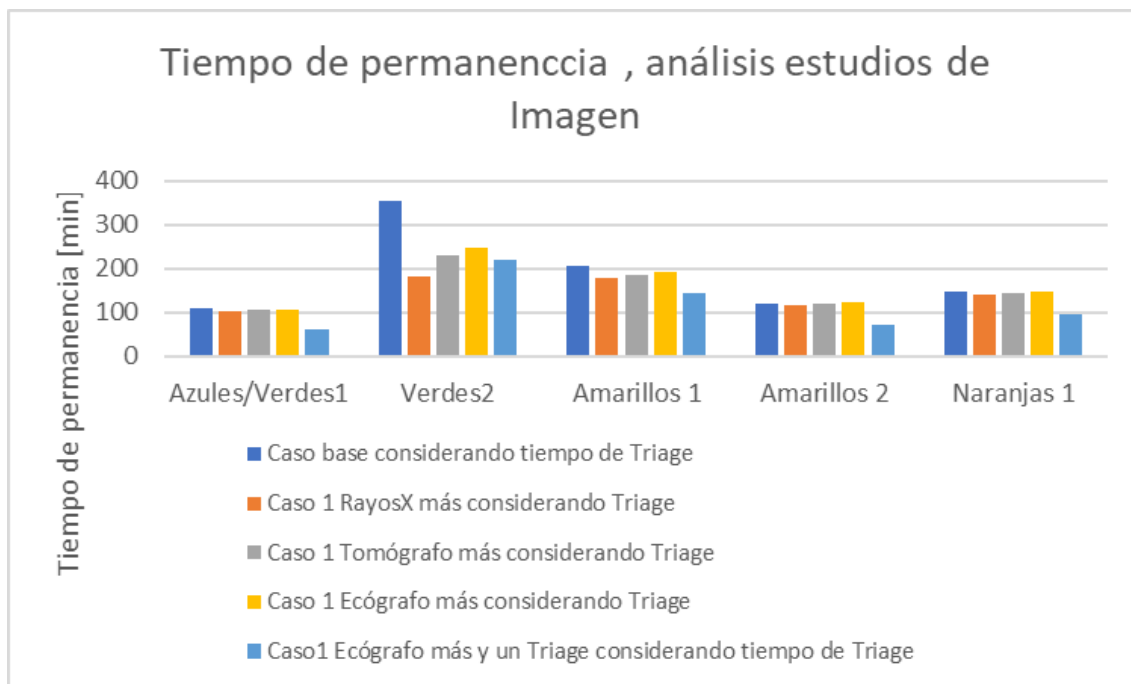


Figura 7-6: Tiempo de permanencia, análisis estudios de imagen

Se puede ver en la Tabla 7-11 , Tabla 7-12 y

Tabla 7-13 que en todos se los flujos reducen los tiempos desde que se sale del consultorio de Triage hasta que la persona sale del sistema. Es coherente que no se reduzca el tiempo en el Triage ya que no se ve modificado ningún componente hasta después de este.

El caso que mejor reduce el tiempo de permanencia es agregar un Rayos X más, reduciendo los tiempos en un 22% para los **Verdes** y 8,3% para los **Amarillos 1**.

7.2.8 Estudio de cantidad de salas Rayos X, Ecografía, Tomografías, combinado con Triage y/o consultorios

El último caso de variación de recursos en simultáneo que se analiza es el de sumar Triage, Rayos X, Tomógrafos o Ecógrafos y consultorios. En este caso se puede observar disminución de los tiempos de Triage, **Verdes**, y **Naranjas2** en las siguientes tablas (Tabla 7-14, Tabla 7-15 y Tabla 7-16).

Tabla 7-14: Tiempo de permanencia por clasificación de pacientes, caso: 1 ecógrafo más y un Triage más

Tiempo medio de permanencia por clasificación de pacientes [min]								
Clasificación de paciente	Triage	Azules	Verdes	Amarillos 1	Amarillos 2	Naranjas 1	Naranjas 2	Rojos
Caso base	65.1	44.9	288.4	139.3	53	81.2	1128.2	106.5
Caso base considerando tiempo de Triage	N/A	110	35.5	204.4	118.1	146.3	N/A	N/A
Caso 1 Ecógrafo más y un Triage más	19.9	40.7	198.1	125.3	53.4	77.1	1226.1	101.8
Caso1 Ecógrafo más y un Triage considerando tiempo de Triage	N/A	60.6	218	145.2	73.3	97	N/A	N/A

Tabla 7-15: Tiempo de permanencia por clasificación de pacientes, caso: 1 tomógrafo más y un Triage más

Tiempo medio de permanencia por clasificación de pacientes [min]								
Clasificación de paciente	Triage	Azules	Verdes	Amarillos 1	Amarillos 2	Naranjas 1	Naranjas 2	Rojos
Caso base	65.1	44.9	288.4	139.3	53	81.2	1128.2	106.5
Caso base considerando tiempo de Triage	N/A	110	35.5	204.4	118.1	146.3	N/A	N/A
Caso 1 Tomógrafo más y un Triage más	21.1	44.2	209.1	125.3	55.4	77.2	1124.5	108.2
Caso 1 Tomógrafo más y un Triage considerando tiempo de Triage	N/A	65.3	230.2	146.4	76.5	98.3	N/A	N/A

Tabla 7-16: Tiempo de permanencia por clasificación de pacientes, caso: 1 Rayos X más y un Triage más

Tiempo medio de permanencia por clasificación de pacientes [min]								
Clasificación de paciente	Triage	Azules	Verdes	Amarillos 1	Amarillos 2	Naranjas 1	Naranjas 2	Rojos
Caso base	65.1	44.9	288.4	139.3	53	81.2	1128.2	106.5
Caso base considerando tiempo de Triage	N/A	110	35.5	204.4	118.1	146.3	N/A	N/A
Caso 1 Rayos X más y un Triage más	20.3	40.2	138.4	120.5	53.3	79.2	1224.3	102.6
Caso 1 RayosX más y un Triage considerando tiempo de Triage	N/A	60.5	158.7	140.8	73.6	99.5	N/A	N/A

Por último, se estudia el caso similar al anterior con la salvedad de disminuir en una unidad los consultorios, para poder analizar la posibilidad de disminuir un consultorio y convertirlo en Triage.

Tabla 7-17: Tiempo de permanencia por clasificación de pacientes, caso: 1 Rayos X más, un Triage más y un consultorio menos.

Tiempo medio de permanencia por clasificación de pacientes [min]								
Clasificación de paciente	Triage	Azules	Verdes	Amarillos 1	Amarillos 2	Naranjas 1	Naranjas 2	Rojos
Caso base	65.1	44.9	288.4	139.3	53	81.2	1128.2	106.5
Caso 1 rayos, un consultorio menos y Triage más	19.1	41.1	143.6	119.3	53.2	82.1	1146	108

Luego del análisis, se llega a los resultados presentados en la Tabla 7-17. Este es el escenario más favorable de todo el estudio, reduciendo el tiempo del Triage en un 70%, el tiempo de los **Verdes** en un 50% y **Amarillos** tipo 1 en un 14%.

7.2.9 Estudio de la cantidad de camas de Reanimación.

En este caso se analiza si es posible mejorar el tiempo de permanencia de los pacientes más críticos, es decir los **Rojos**, al agregar una sala de Reanimación más. Los resultados obtenidos son muy similares a los del caso base, por lo que se llega a la conclusión que agregar una sala de Reanimación más no mejoraría el tiempo de permanencia de los pacientes **Rojos** significativamente. Por otro lado, se estudió el impacto de eliminar una de las salas de

reanimación y el impacto es que el tiempo de permanencia medio de dichos pacientes se ve aumentado en 9 minutos, por lo que no tiene sentido eliminarla ya que se trata de personas en estado crítico en el que no se puede demorar en atenderlos.

7.2.10 Estudio de la cantidad de camas de Cuidados Intermedios.

Similar a la Sección 7.2.9 e quiere analizar el impacto de cambiar la cantidad de camas de los cuidados intermedios con el fin de mejorar el tiempo de permanencia de los pacientes **Naranjas 2**. Al aumentar el valor inicial en una cama no se encuentran cambios significativos, no obstante, al disminuir en una unidad, se ve que se aumentan los tiempos de permanencia en un 10%. Por lo que no se recomienda la disminución de dicho recurso.

7.3 OPTIMIZACIÓN EN ANYLOGIC

En esta sección se recurre a la herramienta de optimización de AnyLogic. La optimización en AnyLogic se basa en el motor de optimización OptQuest. El mismo encuentra automáticamente los mejores parámetros de un modelo, con respecto a ciertas restricciones (Anylogic, 2023).

OptQuest utiliza el algoritmo Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-2). El NSGA-2 es una heurística, es decir, no garantiza la optimalidad. Dicho algoritmo es genético, con una selección de apareamiento y de supervivencia modificada. Es decir que, si se tiene X parámetros de entrada y se quiere mejorar un parámetro F de salida, en primera instancia el algoritmo toma combinaciones posibles de X. Luego, se pasaría a una segunda generación de combinaciones de X, cuyo resultado F sea mejor que el de la primera generación. De esta manera el algoritmo obtiene nuevas generaciones con mejores genes, es decir mejor F. El algoritmo puede detenerse mediante un determinado número de iteraciones, tiempo de ejecución o que se tiene una diferencia menor a un determinado F, luego se elige la mejor combinación de X de la última generación como resultado final. Cuando se cuenta con más de un objetivo los cuales se encuentran en conflicto, las nuevas generaciones obtienen genes que permiten acercarse a un punto de equilibrio y mejorar el sistema en su totalidad (Deb et al., 2002).

En la versión utilizada, Anylogic permite realizar varias iteraciones, permitiendo asignarle un rango en el cual variar hasta seis parámetros. Para este caso se eligen los recursos según dos criterios: los que tienen mayor impacto en los cambios estudiados y a su vez los que tienen mayor porcentaje de utilización. Para el caso de los recursos de Imagen se optó por variar en una sola unidad, debido al gran impacto económico que tendría modificar la cantidad de todos dichos recursos.

La función objetivo que se quiso minimizar fue el tiempo de permanencia para ser clasificado en el Triage, es decir Tiempo de Permanencia Triage, y el Tiempo de Permanencia Pacientes **Verdes**. Esto es debido a que los lugares en donde se generan cuellos de botellas son la sala de Triage y los consultorios. Al ser los pacientes color **Verde**, tienen menor preferencia para usar los consultorios, al disminuir el tiempo de permanencia de dichos pacientes, se disminuye el de todos los pacientes que utilizan dicho recurso.

Función Objetivo: Tiempo permanencia Triage + Tiempo de permanencia Verdes2

Para el proceso de optimización, se le asignan una variación de a una unidad a las variables ya mencionadas. Los resultados obtenidos son los que se pueden ver en la columna Best de la Figura 7-7, es decir:

- 8 médicos
- 3 Triage
- 13 boxes
- 9 sillones
- 5 consultorios
- 2 rayos X

Clinicas1 : Optimization

	Current	Best
Iterations completed:	38	6
Replications:	10	10
Objective: ↓	0	0
Parameters		Copy best
cantEnfermeros	24	24
cantMedicos	9	8
cantImagen	10	10
cantPar	2	2
cantCirujano	4	4
cantTriage	2	3
cantBox	13	12
cantSillon	12	9
cantConsultorio	5	5
cantReanimacion	3	3
cantRayosX	1	2
cantTomografia	1	1
cantParSource	2	2
cantUltraSon	1	1
cantCI	4	4
cantAreaP	2	2

Figura 7-7: Resultados optimización en AnyLogic

En la Tabla 7-18 se observan los resultados al correr el modelo utilizando la cantidad de recursos obtenidos con OptQuest. Luego el software realizó un total de 38 iteraciones, con

diferentes recursos asignados y para cada una se utilizan 10 valores de semillas diferentes. Al sistema se le optó por tener una variación de semillas de 10, ya que es la media utilizada en pruebas anteriores, luego el software internamente elige la cantidad de iteraciones por semilla. La columna Current muestra los resultados de la última corrida, mientras que la columna Best muestra la mejor configuración de parámetros obtenida. Los resultados encontrados en OptQuest siguen la tendencia de los análisis anteriores. Se muestra que con el aumento de las salas de Triage mejoran el tiempo de estadía de todas las categorías de pacientes. Luego también se da el resultado de aumentar en uno la sala de Ratos X, lo cual se nota una disminución del tiempo de espera de los pacientes clasificados del **Verde 2** hasta **Naranja 1**.

Tabla 7-18: Tiempo de permanencia caso OptQuest

Tiempo medio de permanencia por clasificación de pacientes [min]								
Clasificación de paciente	Triage	Azules/ Verdes1	Verdes2	Amarillos 1	Amarillos 2	Naranjas 1	Naranjas 2	Rojos
Caso base	65.1	44.9	288.4	139.3	53	81.2	1128.2	106.5
Caso base considerando el tiempo del Triage	N/A	110	35.5	204.4	118.1	146.3	N/A	N/A
Caso OptQuest	20.3	51.8	165.4	133	54	82.1	1073.5	104.2
Caso OptQuest, considerando tiempo de Triage	N/A	72.1	185.7	153.3	74.3	102.4	N/A	N/A

Luego, en la Figura 7-8 se puede visualizar la mejora de tiempos de permanencia con respecto al caso base. Se observa una mejora de tiempos de permanencia para los pacientes **Azules**, **Verdes**, **Amarillos** y **Naranjas 1**. Los pacientes que disminuyen más en comparación al caso base son los **Verdes 2**, con un 48% de mejora. Esto es debido a que son los que más espera tienen debido a que comparten recursos con pacientes más críticos y tienen la menor prioridad. Es decir, aunque haya entrado en la fila de espera antes que un paciente más crítico, va a tener que esperar a que se liberen los recursos en espera y no se encuentren pacientes más críticos en la fila, para ser atendidos.

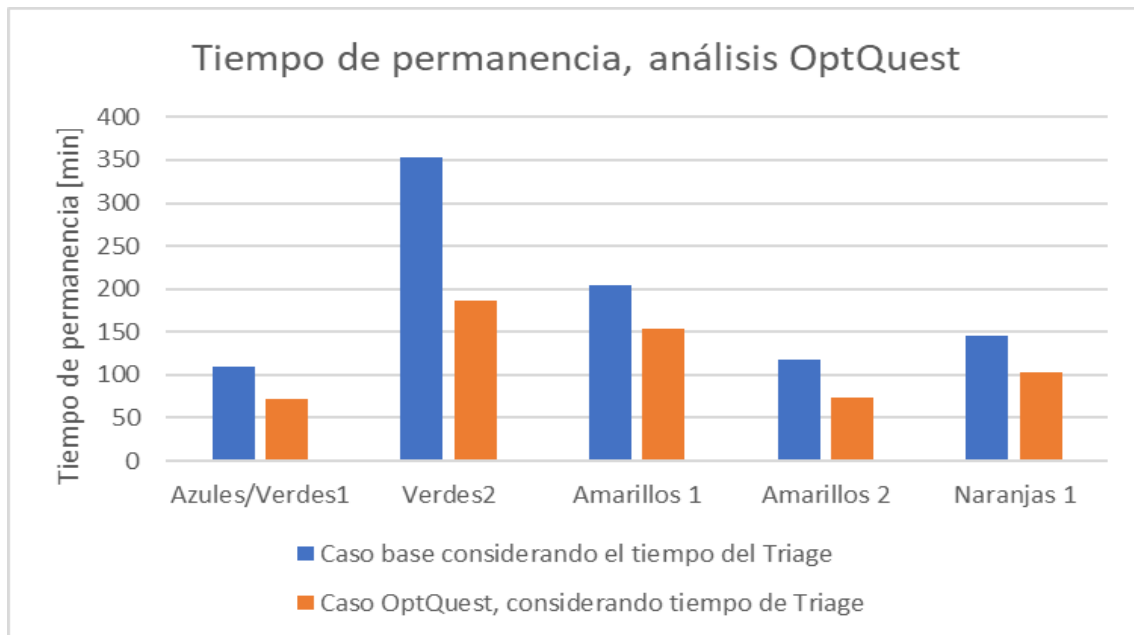


Figura 7-8: Tiempo de permanencia, análisis OptQuest

7.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez finalizados todos los casos, se generó una tabla comparativa para analizar los escenarios más favorables (ver Tabla 7-19). La tabla utiliza una escala de color en donde el verde implica una mejora de tiempo de permanencia en comparación con el caso base, el amarillo cambios menores y el rojo aumentos del tiempo de permanencia.

Al examinar la Tabla 7-19, se puede observar que el caso más favorable para reducir el tiempo de permanencia hasta el Triage se logra mediante las modificaciones que incluyen un aumento en el número de Triage, siendo el caso más favorable aquel que agrega un Triage adicional y un médico más.

En cuanto a los pacientes clasificados como **Verdes, Azules, Amarillos y Naranjas** tipo 1, los escenarios que más disminuyen el tiempo de permanencia son aquellos que incluyen un aumento en la cantidad de rayos X, tomografía o ecógrafos. Se destaca que el agregar un Rayos X adicional es el escenario más favorable para los pacientes **Verdes** y los **Amarillos 1**, mientras que añadir un ecógrafo adicional mejora el tiempo para los pacientes **Azules**. En el caso de los **Naranjas 1**, cualquiera de las modificaciones mencionadas logra una disminución en el tiempo de permanencia en torno al 5%.

Por último, para los pacientes clasificados como **Amarillos, Naranjas 2 y Rojos**, ninguna de las modificaciones realizadas logra una reducción significativa en el tiempo de permanencia.

Tabla 7-19: Análisis de tiempo de permanencia de los valores de la experimentación previa a la optimización, los valores más verdes son los más pequeños, mientras que los más rojos los más grandes

Modificación	Tiempo Triage	Tiempo azules	Tiempo verdes	Tiempo amarillos	Tiempo amarillos II	Tiempo naranja I	Tiempo naranja II	Tiempo rojos
1 triage más	20,7	49,9	394,2	146,6	53,4	82,4	1134,8	107,5
1 triage más de 12 a 18hs	28,1	51,5	378,2	147,7	54,3	82,6	1087,9	104,8
1 cama más	69,3	45,1	278,9	143,9	56,7	81,2	1170,1	105
1 consultorio menos	72,7	46,2	293,1	149,5	57,2	84,6	1111,2	105,2
2 consultorio menos	71,5	43,5	328,1	144,5	54,6	82,2	1130,1	106,7
1 consultorio más	64,8	44,6	271,6	136,5	53,1	81,9	1121,4	105,4
1 triage más y 1 medico más	19,4	52,3	312,9	138,6	53,1	82,5	1141,1	106,4
1 triage más y 2 medico más	20,2	49,6	274,5	140,7	53,1	81,8	1124,1	106,2
1 triage más de 12 a 18, 1 médico más , 1 Rayos X más	27,1	51,2	162,4	132	53,6	81,4	1097,8	106,7
1 Rayo X más	63	39,2	118	115,2	53,4	77,2	1153	107
1 Tomógrafo más	67,2	39,3	164	117	53,4	78,2	1040	111
1 Ecógrafo más	68,4	38,8	172	122,2	54,4	78,6	1070	108
1 ecógrafo más, un Triage más	19,9	40,7	198	125,3	53,4	77,1	1226,1	101,8
1 tomógrafo más, un Triage más	21,1	44,2	209	125	55	77,1	1124	108
1 Rayos X más, un Triage más	20,1	40,2	138	120	53,3	79,2	1224	102
1 Rayos X más, un Triage más, un consultorio menos	19,1	41,1	143	119,3	53,2	82,2	1146	108,3

Otros escenarios que mejoran el tiempo del Triage son aquellos que agregan un Triage extra de 12 a 18 horas. Esto resulta en una mejora de aproximadamente 58% en comparación con el caso de agregar un Triage completo que mejora en un 70% el tiempo de permanencia.

Haciendo un detalle en los escenarios que mejoran los tiempos de permanencia según el color de clasificación, se tiene que para los pacientes de clasificación **Azul**, los escenarios más favorables son aquellos que incluyen la incorporación de Rayos X, Tomografía, Ecografía. La mejora en estos casos es de aproximadamente 12%.

Para los pacientes de clasificación **Verde**, los escenarios más favorables son aquellos que incorporan rayos X, tomografía o ecografía, siendo el caso más favorable aquel que agrega un Rayos X adicional, que mejora el tiempo en un 59%.

El tiempo de permanencia de los pacientes de clasificación **Amarillo 1** mejora con el aumento en la cantidad de Rayos X, tomografía y ecografía. El escenario más favorable es aquel que agrega un Rayos X adicional que mejora los tiempos en un 17%. Los tiempos de permanencia de los pacientes de clasificación **Naranja 1** mejoran cuando se incorporan rayos X, tomografía o ecografía en un 5%. Por último, los pacientes de clasificación **Amarillo 2, Naranja 2 y Rojo** no presentan grandes variaciones en sus tiempos de permanencia para ninguno de los casos evaluados.

No se observaron efectos significativos en los tiempos de permanencia al variar la cantidad de camas, boxes, médicos o enfermeros en el sistema.

Se determina que los escenarios más efectivos para disminuir de manera significativa los tiempos de permanencia en el sistema son aquellos que incorporan una sala de Triage adicional o aumentan la disponibilidad de consultorios de Rayos X, Tomografía o Ecografía. Entre los consultorios mencionados, se destaca que el consultorio de Rayos X es identificado como la restricción principal del sistema, presentando una utilización del 94% en la configuración normal (sección 5.1. Resultados caso base). Esta alta utilización se debe a que se modeló la demora en los consultorios con especialistas mediante una distribución triangular,

con un máximo de 2 horas, que representa el tiempo que los especialistas pueden tardar en llegar a la sala de emergencias en caso de no estar de guardia.

Por otra parte, se recomienda prestar especial atención a la duración del proceso de Triage. Según lo conversado con el equipo de gestión de la emergencia, en ocasiones el espacio de Triage es utilizado como consultorio con el fin de resolver la problemática del paciente directamente, no solamente clasificarlo, lo que aumenta el tiempo de la consulta. Este tiempo se modeló como una distribución triangular de mínima 3 minutos, media 5 minutos y máxima 7 minutos. Con estos valores se observa que el consultorio de Triage tiene una utilización del 64%. Por lo tanto, se debe tener especial precaución con las demoras en este eslabón, ya que es utilizado por todos los pacientes que ingresan a la sala, tanto los casos leves que ingresan directamente, como los casos graves que utilizan recurso de Triage para ingresar los datos posteriormente a que se los estabiliza.

A continuación, se presentan las recomendaciones derivadas del análisis de experimentación. Es importante mencionar que estas recomendaciones se centran únicamente en el estudio de tiempos de permanencia de los pacientes en el sistema de la sala de emergencias, sin considerar los costos asociados a los cambios propuestos:

- **Aumentar los consultorios de Triage:** Sumar un espacio de Triage disminuye el tiempo de permanencia hasta el Triage en un 70%. Asimismo, sumar un espacio únicamente en los horarios de más flujo de pacientes disminuye este tiempo en un 60%. Sumado a esta recomendación, se sugiere evaluar la opción de utilizar un consultorio médico como espacio de Triage, ya que el óptimo de consultorios según la optimización es de 5 unidades, mientras que actualmente se tienen 6 disponibles.
- **Aumentar la cantidad de los consultorios de Rayos X, Tomografía o Ecografía:** Se observa que al incrementar la disponibilidad de estos consultorios puede tener un impacto significativo en la reducción del tiempo de permanencia de los pacientes más leves. En particular, se ha registrado una disminución del 59% en el tiempo de permanencia de los pacientes de clasificación Verde2, un 17% en los pacientes de clasificación Amarillo1 y un 12% en los pacientes de clasificación Azul. Es importante destacar que, de ser necesario elegir una única opción para aumentar, se recomienda priorizar el aumento de consultorios de Rayos X, dado que actualmente se identifica como la restricción del sistema con la configuración actual.
- **Aumentar la cantidad de consultorios de Triage, consultorios de Rayos X y disminuir la cantidad de consultorios médicos en una unidad:** Relacionado a lo mencionado anteriormente, la configuración óptima encontrada incluye aumentar los consultorios de Triage, aumentar en una unidad los consultorios de Rayos X y disminuir un consultorio médico. Esto da el escenario más favorable en simultaneo para los pacientes de tipo Verde (-50%), Azul (-10%), Amarillos I (-14%) y una disminución del tiempo hasta el triage del 70%.

8 CONCLUSIONES

En esta sección, se presentan las conclusiones del proyecto, así como las lecciones aprendidas durante su desarrollo. Además, se discuten las recomendaciones para futuros trabajos que el equipo considera importantes de remarcar.

Como conclusiones generales, se lograron alcanzar los objetivos planteados los cuales incluían encontrar configuraciones que mejoren los tiempos de permanencia de los pacientes en la sala de emergencias del Hospital de Clínicas mediante el uso de técnicas de simulación y optimización.

El proyecto estableció el primer contacto con los involucrados del Hospital de Clínicas con el fin de comprender el funcionamiento de la sala de emergencias y definir la primera versión del propósito del proyecto. Después de mantener reuniones con el equipo de gestión de la sala de emergencias, se realizó el modelado de la situación. Una vez se finalizó con este punto, se trabajó en colaboración con el departamento de División Tecnologías de la Información del hospital para obtener y posteriormente procesar los datos necesarios. Para esto se generó un procesador de datos en Google Data Studio¹³. Estos datos fueron posteriormente utilizados como entradas para el modelo de simulación.

Para el desarrollo del modelo de simulación se llevó a cabo un exhaustivo estudio de la teoría y las recientes aplicaciones de las técnicas de simulación y optimización aplicadas al sector hospitalario, reflejadas en el Estado del Arte (Anexo I). A su vez, en este estudio se analizaron los distintos softwares de simulación con optimización disponibles. Tras el análisis de las opciones disponibles, se eligió el software AnyLogic, como la herramienta que más se adecuaba a los requerimientos del proyecto. Con el objetivo de aprender y estudiar en profundidad el software, se realizaron distintas capacitaciones para posteriormente generar el modelo de simulación. El modelo pasó por una serie de pruebas para corroborar su correcto funcionamiento y validar la veracidad con la que refleja la realidad de la sala de emergencias. Posteriormente se realizaron pruebas de experimentación que permitieron encontrar la restricción del sistema: el consultorio de Rayos X y el de Triage. Como se menciona en la Sección 7.4 no se encontraron cambios en los tiempos de permanencia significativos al variar la cantidad de camas, boxes, médicos o enfermeros en el sistema. Luego, los escenarios en los que se disminuyó el tiempo de espera de la mayoría de los pacientes fue el aumentar las salas de Triage y las salas de Rayos X.

Durante el desarrollo de este proyecto, se han aprendido distintas lecciones, algunas de las más destacadas son las siguientes:

- **Aplicación de conceptos de ingeniería en un trabajo práctico:** El equipo logró aplicar conceptos y teoría aprendidos durante los años de formación académica y se destaca la importancia de aprender determinados conceptos como son, simulación, optimización, gestión de proyectos, teoría de restricciones, entre otros.
- **Realizar el análisis bibliográfico previo a la ejecución:** Se realizó una revisión bibliográfica y un documento que resume las técnicas de simulación y optimización aplicadas a problemas de gestión logística. Se destaca la importancia de una

¹³ [Procesamiento de datos](#)

exhaustiva revisión bibliográfica previo a la ejecución, para la correcta comprensión de la teoría, las prácticas actuales y posteriormente aplicarlas al proyecto.

- **La comunicación clara en equipos multidisciplinares:** A lo largo del proyecto, se logró mantener una comunicación fluida y clara, tanto dentro del equipo como con los tutores y los involucrados del Hospital de Clínicas. No obstante, surgieron dificultades a la hora de recopilar los datos, especialmente aquellos que no contaban con registro y debían ser proporcionados por miembros del equipo de gestión de la sala. Esta situación dejó la lección de la importancia de verificar todos los aspectos antes de realizar interpretaciones, mantener una comunicación clara y constante durante todo el proyecto y asegurarse de que todas las partes estén alineadas sea cual sea el aspecto.
- La riqueza de la co-creación en mezcla de disciplinas: Una de las mayores lecciones aprendidas es la riqueza de la co-creación y la colaboración entre disciplinas distintas. Este proyecto resultó sumamente enriquecedor al combinar los conocimientos y enfoques de dos disciplinas diferentes, como son la medicina y la ingeniería. La colaboración fue fundamental para comprender la complejidad del hospital y así generar un modelo que se asemeje a la realidad. Sumado a esto, el llegar a escenarios que mejoren los tiempos de permanencia y con esto llegar a impactar en la calidad de atención de los pacientes brindó un sentido más humano al proyecto. Por último, se quiere destacar cómo este estudio es un ejemplo de cómo la ingeniería puede utilizarse para el beneficio de la comunidad e impactar en la vida diaria de las personas.

Se desean destacar los trabajos futuros que podría tener este proyecto, basados en la experiencia y enfocados en la mejora de la calidad de la sala de emergencias:

1. **Computarización de todos los movimientos de la sala de emergencias:** Es clave para poder analizar y así tomar decisiones informadas el hecho de tener la mayor cantidad de datos posibles. Un posible trabajo futuro puede involucrar la gestión del cambio en la computarización de la rutina de los agentes de la sala o la implementación de nuevas tecnologías como pueden ser sensores o dispositivos que recopilen datos autónomamente y así se tengan datos precisos y actualizados sobre la sala.
2. **Implementar en el día a día un visualizador de datos actualizado:** Relacionado con el primer punto, al tener una mayor cantidad de datos, se pueden procesar y utilizar para mejorar la toma de decisiones en el día a día. Esto puede permitir también generar modelos de simulación que ayuden a entender mejor la realidad, ya que uno de los problemas que se tuvieron en el presente trabajo es la falta de datos para validar el correcto funcionamiento del simulador.
3. **Identificar y gestionar capacitaciones para la evolución:** Uno de los puntos a destacar de la experimentación realizada, es que los recursos médicos y enfermeros no representan una restricción con la configuración actual. Con esa base, sería beneficioso realizar capacitaciones y brindar apoyo al personal de la sala de emergencias para adaptarse y aprovechar al máximo las nuevas tecnologías y metodologías, como la inteligencia artificial y la toma de decisiones basada en datos. Esto puede utilizarse para automatizar decisiones, optimizar la asignación de recursos y predecir patrones.
4. **Análisis de costos de las propuestas al Hospital de Clínicas:** Es importante realizar un análisis detallado de los costos asociados a las conclusiones propuestas. Esto permitirá evaluar no solo los tiempos de permanencia, sino también la viabilidad económica de las propuestas planteadas.

En resumen, se entiende de gran importancia poder continuar con distintos trabajos entre la Facultad de Ingeniería y la Facultad de Medicina con respecto a la Sala de Emergencias del Hospital de Clínicas. Todo el equipo de gestión de la sala presentó gran motivación a lo largo del proyecto, lo que deja un precedente muy positivo y afirma la importancia de aplicar conceptos de ingeniería de procesos en uno de los hospitales públicos más importantes del país.

REFERENCIAS

- Aboueljinane, L. & Frichi, Y., 2022. *A simulation optimization approach to investigate resource planning and coordination mechanisms in emergency systems*. Simulation Modelling Practice and Theory., 119(102586).
- Aboueljinane, L., Sahin, E. & Jemai, E., 2013. *Emergency ambulance deployment in Val-de-Marne department: a simulation-based iterative approach*. International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications, pp. 565–576..
- Allaire, G., 2007. *Numerical Analysis and Optimization*. pp. 277-292.
- Almehdawe, E., Jewkes, B. & He, Q., 2013. *Queueing model for ambulance offload delays*, Eur. J. Oper. Res. 226(3), 02–61.
- Anylogic, 2023.
Disponible en: <https://www.anylogic.com/>
[Último acceso: Marzo 2023].
- Arena, 2023. *Arena Simulation Software*.
Disponible en: <https://www.rockwellautomation.com/en-us/products/software/arena-simulation.html>
[Último acceso: Marzo 2023].
- Aristimuño, I., Larzábal, V. & Silvera, M., 2021. *Modelado y simulación para problemas de gestión logística: Una aplicación a la Gestión Hospitalaria*. Informe Final Proyecto de grado, Universidad de la República.
- Banks, J., Carson, J., Nelson, B. & Nicol, D., 2004. *Discrete-Event System Simulation*. pp. 60-77.
- Barros, O., Weber, R. & R. C., 2021. *Demand analysis and capacity management for hospital emergencies using advanced forecasting models and stochastic simulation*, Operations Research Perspectives, 8 (100208).
- Becerra, M., Herrera, M., Trejos, C. & Romero, O., 2021. *Resources Allocation in Service Planning Using Discrete Event Simulation*. Ingeniería y Universidad, 25(1), pp. 1-22.
- Carmen, R. Van Nieuwenhuyse, I., & Van Houdt, B., 2018. *Inpatient boarding in emergency departments: impact on patient delays and system capacity*. Eur. J. Oper. Res., 271(3).
- Castanheira-Pinto, A., Gonçalves, B., Lima, R. & Dinis-Carvalho, 2021. *Modeling, Assessment and Design of an Emergency Department of a Public Hospital through Discrete-Event Simulation.*, 11 (2), pp. 1-25.
- Checkland, P., 1981. *Systems Thinking, Systems Practice*. pp. 30-59.
- Chen, R., R. Sharman, H. & Rao, S. U., 2008. *Coordination in emergency response management*. Commun. ACM 51(5), pp. 66–73.
- Concannon, K., 2007. *Simulation Modeling with Simul8*.

Curso Ingeniería de Software, 2008. *EVA - FIng - Udelar*.

Disponible en:

<https://www.fing.edu.uy/tecnoinf/maldonado/cursos/ingsoft/materiales/teorico/is09-Verificacion-Validacion.pdf>

[Último acceso: Abril 2023].

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. & Meyarivan, T., 2002. *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation., 6(2), pp. 182-197.

Doudareva, E. & Carter, M., 2021. *Using Discrete Event Simulation To Improve Performance At Two Canadian Emergency Departments*.

Facultad de Ciencias Económicas y de Administración - Universidad de la República, 2011.

Camaño, Gabriel; Goyenche, Juan José. Disponible en:

<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/10558?mode=full>

[Último acceso: Setiembre 2023].

Facultad de Ingeniería - Universidad de la República, 2022. *Mauttone, Antonio Notas UC: Simulación a Eventos Discretos*.

Disponible en: <https://eva.fing.edu.uy/mod/forum/view.php?id=117407>

[Último acceso: Diciembre 2022].

Figuerola, L., Aguirre, S. & Whilches, M., 2016. *Análisis de la Logística Hospitalaria aplicada en las Entidades de Salud de Nivel 3 y 4 en la ciudad de Barranquilla*. Scientia Et Technica, 21(4), pp. 307-317.

FlexSim, 2023.

Disponible en: <https://www.flexsim.com/es/flexsim/>

[Último acceso: Mayo 2023].

Fun, W. 2022. *Applying Discrete Event Simulation to Reduce Patient Wait Times and Crowding: The Case of a Specialist Outpatient Clinic with Dual Practice System*. Healthcare (Basel), 10(2), pp. 189.-190.

Garcia-Vicuña, D. & Mallor, F., 2021. *Improving Input Parameter Estimation in Online Pandemic Simulation*. Proceedings of the 2021 Winter Simulation Conference.

Gehlot, V. y otros, 2021. *For Healthcare Professionals: A Colored Petri Nets Based Approach For Modeling And Simulation Of Healthcare Workflows*. Proceedings of the 2021 Winter Simulation Conference.

Ghanes, K., 2015. *Simulation-based optimization of staffing levels in an emergency department*. Simulation 91 (10) 942–953.

GoldSim, 2023.

Disponible en: <https://www.goldsim.com/Web/Home/>

[Último acceso: Marzo 2023].

Gul, M. & Guneri, A., 2015. *A comprehensive review of emergency department simulation applications for normal and disaster conditions*. Computers & Industrial Engineering, 83(1), pp. 327-344.

Han, Q., Zeng, L., Liu, Y. & Liu, Y., 2014. *An adaptive clustering algorithm for road abnormal region analysis*. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 36(1), pp. 88-98.

Hassan, T., 2006. *Logistique hospitalière : organisation de la chaîne logistique pharmaceutique*.

HC, 2023. *Hospital de Clínicas*.

Disponible: <https://www.hc.edu.uy/index.php/el-hospital>

[Último acceso: Febrero 2023].

Huang, S., Fu, Z., Liu, C. & Li, J., 2023. *Multi-objective optimization of fiber laser cutting quality characteristics of glass fiber reinforced plastic (GFRP) materials*. *Optics & Laser Technology*, 167(1).

Hu, M., 2017. *A high-fidelity three-dimensional simulation method for evaluating passenger flow organization and facility layout at metro stations*. *Simulation*, 93(10), pp. 841-851.

ISTQB, 2023.

Disponible en:

https://glossary.istqb.org/en_US/search?term=verification&exact_matches_first=false

[Último acceso: Mayo 2023].

Joskowicz, R. E. a. L., 2023. *Verification, Evaluation, and Validation: Which, How & Why, in Medical Augmented Reality System Design*. *Journal of Imaging*, 9(2), pp. 20-21.

Jun, J., Jacobson, S. H. & Swisher, J. R., 1999. *Application of Discrete-Event Simulation in Health Care Clinics: A Survey*. *The Journal of the Operational Research Society*, 50(2), pp. 109–123.

Kamarudeen, N., Sundarakani, B. & Manikas, I., 2020. *An Assessment of the Dubai Metro Service's Performance Using SCOR Model and ARENA Simulation*. *FIIB Business Review*, pp. 9(3) 167–180.

Larrea, L., Lam, E. & Sanabria, E., 2021. *Simulating New York City Hospital Load Balancing During Covid-19*. *Winter Simulation Conference*.

Law, A. M., 2013. *Simulation modeling and analysis*. pp. 1-78.

Lim ME, N. T. B. J., 2012. *Mathematical modeling: the case of emergency department waiting times.*, s.l.: *Int J Technol Assess Health Care* 2012; 28(2): 93–109.

Maidstone, R., 2012. *Discrete Event Simulation, System Dynamics and Agent Based Simulation: Discussion and Comparison*, : The University of Manchester.

Meara, J. G. & Greenberg, S. L., 2015. *The lancet commission on global surgery global surgery 2030: Evidence and solutions for achieving health, welfare and economic development*. *Global Surgery*, 157(5), pp. 834–835.

Mohamed, I., 2020. *A Discrete Event Simulation Model for Waiting Time Management in an Emergency Department: A Case Study in an Egyptian Hospital*. *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*, 12(1).

Muñoz, A., 2020. *El Claustro de la Facultad de Medicina eligió a Álvaro Villar como nuevo director del Hospital de Clínicas*. *La Diaria*, 17 diciembre 2020.

Mustafee, N., Katsaliaki, K. & Taylor, S. J., 2010. *Profiling Literature in Healthcare Simulation*. *Simulation*, 86(8-9), pp. 543–558.

PMBOK, 2004. *Guía de los Fundamentos de la Dirección de Proyectos*. Project Management Institute.

- Pooch, U. & Wall, J., 1992. *Discret Event Simulation: A practical approach*. CRC Press, pp. 1-32.
- Privett, N. & Gonsalvez, D., 2014. *The top ten global health supply chain issues: perspectives from the field*. *Operations Research for Health Care*, 3(4), pp. 226- 230.
- ProModel, 2023.
Disponibile en: <http://promodel.com.mx/promodel/>
[Último acceso: Julio 2023].
- Przywara, B., 2010. *Projecting futur health car expenditure at European level: drivers, methodology and main results*. *European Economy - Economic Papers*, 417(1), pp. 2008-2015.
- Real Academia Española, 2023.
Disponibile en: <https://www.rae.es/>
[Último acceso: Marzo 2023].
- Robinson, S., 2004. *Simulation: The Practice of Model Development and Use*. John Wiley & Sons Ltd, pp. 1-12.
- Roza, M., Voogd, J. & Sebalj, D., 2012. *The Generic Methodology for Verification and Validation to support acceptance of models, simulations and data*. *Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology*, 10(4), pp. 347-365.
- Simio, 2023.
Disponibile en [ww.simio-simulacion.es/](http://www.simio-simulacion.es/)
[Último acceso: Julio 2023].
- Simul8, 2023.
Disponibile en: <https://www.simul8.com/software/system-requirements#networks>
[Último acceso: Marzo 2023].
- Sommerville, I., 2016. *Software Engineering*. Pearson Education Limited, pp. 226 - 254.
- Tanantong, T., Pannakkong, W. & Chemkomnerd, N., 2022. *Resource management framework using simulation modeling and multi-objective optimization: a case study of a front-end department of a public hospital in Thailand*. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 22(10).
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Mesbahi, R., Ghanavati-Nejad, M. & Tajally, A., 2022. *Simulation of the COVID-19 patient flow and investigation of the future patient arrival using a time-series prediction model: a real-case study*. *European Journal of Operational Research*, 302(1), pp. 337-347.
- Vali-Siar, M., Gholami, S. & Ramezhanian, R., 2018. *Multi-period and multi resource operating room scheduling under uncertainty: A case study*. *Comput. Inf. Eng.*, 126(1), pp. 549-586.
- Van der Ham, A., 2019. *Identifying logistical parameters in hospitals: Does literature reflect integration in hospitals? A scoping study*. *Health Services Management Research*, 32(3), pp. 158–165.
- Villar, H., 2008. *55 años del Hospital de Clínicas “Dr. Manuel Quintela”*. *Revista Medica Uruguaya*, 24(1), pp. 155-160.

Vishnunarayan, Prabhu.K. & Taaffe, R., 2021. *Physician Shift Scheduling To Improve Patient Safety And Patient Flow In The Emergency Department*". Proceedings of the Winter Simulation Conference, 87(1)

Yousefi, M., Kafash, A. & Khani, A., 2020. *Applying species distribution models in public health research by predicting snakebite risk using venomous snakes' habitat suitability as an indicating factor*. Sci Rep, 10(1).

Zeinali, F., Mahootchi, M. & Sepehri, M. M., 2015. *Resource planning in the emergency departments: A simulation-based metamodeling approach*. Simulation Modelling Practice and Theory, 53(1), pp. 123-138.

Zhang, X., 2018. *Application of discrete event simulation in health care: a systematic review*. BMC Health Services Research, 687(18).

Zheng, H., Wang, Q. & Shen. J., K. Y. a. L. J., 2022 . *Modeling and Analysis of Operating Room Workflow in a Tertiary A Hospital*. IEEE Robotics And Automation Letters, 7(3).

***Estado del Arte de
las técnicas de
simulación y
optimización
aplicadas***

Clara López
Isabel Rodríguez

2022

Tutores: Antonio Mauttone y Pedro Piñeyro

1. MARCO TEÓRICO

A continuación, se detalla el Estado del Arte de técnicas de simulación y optimización aplicadas a la logística hospitalaria. El mismo recopila antecedentes, conceptos claves, investigaciones y conocimientos previos, para poder introducir al lector a estos temas.

Posteriormente, se presentan y analizan referencias recientes sobre técnicas de simulación y optimización en el sector hospitalario.

1.1. Logística Hospitalaria

Se comienza definiendo la Logística Hospitalaria, dado que existen definiciones y conceptos que se manejan durante todo el estado del arte.

Hospital: Establecimiento destinado al diagnóstico y tratamiento de enfermos, donde a menudo se practican la investigación y la docencia. (Real Academia Española, 2023).

Logística: Conjunto de medios y métodos necesarios para llevar a cabo la organización de una empresa o de un servicio, especialmente de distribución (Real Academia Española, 2023).

Logística Hospitalaria: Incluye las actividades de diseño, planificación, gestión de suministros de bienes y de servicios, gestión de devoluciones desde el proveedor hasta el beneficiario. Tiene en cuenta los flujos de pacientes y de productos. Las actividades están relacionadas con la cadena de información financiera, de suministros, actividades, contingencias, transporte, entre otros. Su objetivo es poder dar un servicio óptimo y de calidad al paciente (Hassan, 2006).

Triage: Clasificación de los pacientes según el tipo y gravedad de su dolencia o lesión, para establecer el orden y el lugar en que deben ser atendidos (Real Academia Española, 2023).

Unidad de emergencia: es el área del hospital donde se brinda atención médica inmediata a pacientes que presentan situaciones de emergencia o urgencia. Esta área suele estar equipada con tecnología y personal especializado para atender casos críticos y estabilizar a los pacientes antes de ser trasladados a otras áreas del hospital.

La logística hospitalaria puede ser aplicada en varios lugares de un hospital, uno de ellos son las salas de emergencias. Estas son unidades de un hospital que funcionan las 24hs de los 365 días al año.

Es el lugar más crítico dentro de un hospital (Gul & Guneri, 2015). La admisión de pacientes a una emergencia abarca una amplia cantidad de enfermedades y heridas a ser tratadas, clasificándolas desde alto grado de emergencia a no urgentes. El flujo de un paciente viene dado por el Triage, registro, ocupación de una cama, atención médica para diagnóstico tratamiento y laboratorio y por último el alta de la emergencia (Lim, 2012).

Los departamentos de emergencia son sistemas interactivos y tienen que saciar la necesidad de los pacientes que asisten de ser atendidos. Esto conlleva un gran esfuerzo por parte de los empleados del sistema de salud y para cumplir se debe tener la cantidad adecuada de recursos (Yousefi et al., 2020).

El flujo de emergencia se entiende como todo aquel que brinda cuidados a los pacientes bajo condiciones de emergencia clínica. Su objetivo principal consiste en reducir la mortalidad y aumentar la probabilidad de mejora, para ello es necesario una asistencia en el tiempo necesitado (Aboueljine et al., 2013). Debido al envejecimiento de la población y la tendencia de la utilización de sistemas de emergencias para cuidados que no son urgentes más la falta de recursos en la salud generan una alta demanda de servicios para una capacidad de atención limitada (Zeinali et al., 2015). También por el Covid 19 que es una de las peores pandemias de las últimas décadas debido a la gran cantidad de infectados y la demanda de uso de los hospitales (Tavakkoli-Moghaddam et al., 2022). En el momento en que la capacidad de atención se ve superada la calidad de atención disminuye, aumentando los tiempos en las filas de espera y mayores recursos se ven destinados a frenar dicha situación. Por esta razón es por lo que la coordinación en el sector de la salud para la cadena de suministros permite reducir y eliminar los desechos, ayuda a la satisfacción de los pacientes y asegura una óptima manera de la utilización de los recursos (Privett & Gonsalvez, 2014). A nivel de emergencia involucra el pre-hospital y el uso de ambulancias, la sala de emergencias y la sala de intervención (Chen et al., 2008).

Los largos tiempos de espera y lo multitudinarios que son los hospitales está afectando el servicio a brindar a los pacientes (Fun et al., 2022). Dentro de un hospital las salas de operación son las más críticas por el riesgo que se tiene (Zheng et al., 2022). El acceso a cirugía en menor tiempo puede disminuir la tasa de mortalidad y de lesiones graves, también se puede mejorar la productividad y la capacidad en las salas (Meara & Greenberg, 2015).

1.2. Simulación

La simulación puede ser definida de muchas maneras, pero generalmente es una imitación de un sistema (Robinson, 2004). Igualmente, en este estudio el término refiere a la construcción de un modelo abstracto que describe los aspectos del sistema real como una serie de ecuaciones, relaciones y/o sentencias lógicas dentro de programa de computación. A su vez, permite la exploración de escenarios posibles y así poder incorporar mejoras (Facultad de Ingeniería - Universidad de la República, 2022).

El concepto de simulación no es un concepto ajeno a nosotros, está involucrado desde videojuegos, modelos a escala, pronósticos del tiempo, simuladores de habilidades, entre otros (Robinson, 2004).

En Checkland et al. (1981) clasifican los sistemas en cuatro categorías, entre los que se encuentran: sistema natural, sistema físico diseñado, sistema de diseño abstracto y sistema de actividad humana.

- Sistema natural: Centrado en la naturaleza y los orígenes del universo.
- Sistemas físicos diseñados: Resultado del diseño humano de manera física.
- Sistema de diseño abstracto: Resultado del diseño humano de manera abstracta.
- Sistema de actividad humana: Resultado de las actividades humanas realizadas de manera ordenada conscientemente.

1.2.1 Objetivos, ventajas y desventajas de la simulación

La simulación permite experimentar con un modelo en lugar del sistema real y también es útil si el mismo aún no existe (Facultad de Ingeniería - Universidad de la República, 2022).

Tiene como beneficio que los cambios a realizar se pueden evaluar previamente y con esto disminuir la probabilidad de tomar decisiones erróneas, pudiendo ahorrar por ejemplo en: incorporación de maquinaria, construcción de espacios, compra de insumos. Además, al aplicar un cambio de manera física a un sistema para que se logre un comportamiento estable consumiría una gran cantidad de tiempo en comparación a aplicarlo a una simulación.

Otro aspecto positivo de la simulación es que se pueden controlar las condiciones en las que se realizan los experimentos pudiendo simular casos límites para poder probar el alcance del sistema. A esto se le suma que los trabajadores no sufrirían el síndrome de Hawthorne, es decir, que no se comportaría de manera especial por estar siendo estudiados. A su vez, tiene el beneficio de poder simular sistemas que no existen, lo cual permite realizar estudios previos a tener el sistema real.

Por otro lado, la simulación no es recomendable si los problemas a tratar son solucionables con sentido común, experimentos directos de menor costo, se puede resolver directo analíticamente, o simplemente el costo en simulación no justifica el beneficio esperado.

Uno de los principales inconvenientes de la simulación es la posibilidad de acceso a los datos, ya que no siempre se lleva un registro exhaustivo de estos en los lugares a aplicar. Sumado a esto, los datos poseen error numérico ya sea por su fuente o por el tratamiento de los datos, lo que afecta la precisión del modelado.

Otro inconveniente de la simulación es su costo, ya que se necesita invertir en conocimiento técnico especializado no solo en simulación, sino que también en estadística, validación y verificación, programación, entre otros. A su vez, se necesita la obtención de las licencias en el software de simulación como puede ser Arena, Anylogic, ProModel, FlexSim, Simio, entre otros. También es necesario que se cuente con habilidades blandas ya que es altamente común que se trate con personas que no cuenten con conocimiento técnico y hay que saber tratar con ellas de manera de poder obtener la mayor información posible para que el modelado sea lo más acertado posible (Robinson, 2004).

Por último, es necesario detallar los tres objetivos principales de la simulación (Facultad de Ingeniería - Universidad de la República, 2022) comparar, predecir e investigar.

Comprar en el sentido de evaluar los efectos que tiene el sistema ante el cambio en las variables de decisión, ya que la simulación, como ya se detalló, tiene el beneficio de facilitar el estudio de los cambios en las variables de decisión y así poder discriminar el escenario más favorable.

También se puede utilizar la simulación predictivamente, con lo que es posible determinar el estado del sistema en el futuro, teniendo en cuenta las condiciones actuales y analizando la forma de evolucionar que tiene el modelo. Se suele utilizar para generar pronósticos de distintas índoles.

Por último, existen también modelos de investigación, estos intentan proveer un pantallazo del sistema en lugar de realizar una experimentación detallada. Con este tipo de simulación, se

suelen evaluar alternativas en productos, inversiones, innovaciones, para poder evaluarlas y poder posteriormente ponerlas en práctica.

1.2.2 Tipos de simulación

La simulación puede categorizarse de distintas maneras, a continuación, se muestran las más utilizadas en la actualidad, analizando en su gran medida la bibliografía de Robinson (2004):

1.2.2.1 Según el azar de las variables

Los modelos estocásticos son los que contienen al menos una variable obtenida al azar, esto es posible a través de la generación de números aleatorios, números pseudo aleatorios y distribuciones probabilísticas. Los modelos determinísticos son aquellos en los que ninguna de las variables se obtiene al azar. Se fijan como relaciones exactas para las características del modelo actual.

1.2.2.2 Según las variables de tiempo

La simulación estática se diferencia en no tomar explícitamente en cuenta la variable del tiempo. Por el contrario, la simulación dinámica si considera el pasaje del tiempo, siendo una representación más ajustada del sistema ya que el tiempo en la modelo varia proporcionalmente al tiempo del sistema real.

1.2.2.3 Según el paso del tiempo

Cuando se quiere modelar un sistema elegir la modalidad de cómo se va a medir el pasaje del tiempo es algo esencial. Existen tres grandes modalidades, la más sencilla de todas consiste en que se mide el tiempo en intervalos fijos. Luego, se cuenta con la simulación a eventos discretos y la simulación a tiempo continuo.

Simulación con intervalos de salto de tiempo constante

Para la aplicación de esta simulación en primera instancia se define un intervalo de tiempo, cada vez que transcurre el tiempo determinado se toma nota de lo que acontece. El problema consiste en encontrar un intervalo de tiempo que sea acorde al sistema a modelar. Es posible que si el intervalo de tiempo es muy grande queden acciones que sean esenciales sin documentar.

Por el contrario, si se toma un intervalo de tiempo más pequeño, por ejemplo, el tiempo de la acción más rápida, se estarían registrando más de una vez varias acciones. Esto termina siendo ineficiente ya que puede haber acciones repetidas ya que demandan más de un intervalo. Lo que termina siendo importante de reportar es cuando se generan los saltos de actividades, para esto se cuenta con la Simulación a Eventos Discretos (SED).

Simulación a tiempo continuo.

Esta simulación aplica para situaciones en las que los cambios del sistema no se dan de manera discreta si no que suceden de manera continua durante el tiempo. Por ejemplo, es útil si se quiere modelar sistemas en los que se involucran el flujo de fluidos.

Simulación a Eventos Discretos (SED).

La Simulación a Eventos Discretos (SED) tiene la idea general de aproximar la realidad mediante cambios instantáneos en momentos discretos.

La SED es una técnica de investigación de operaciones que puede ser usada para simular el comportamiento de sistemas complejos y crear modelos que representan la realidad de los sistemas con la incorporación de restricciones y entidades con atributos específicos (Zhang, 2018). Se aplica para poder obtener la complejidad con la que se comporta el sistema en su totalidad. Luego se aplica esta herramienta y se une con la optimización de manera de obtener resultados que mejoren el funcionamiento del sistema. Por otra parte, la simulación-optimización utiliza también métodos de optimización para encontrar la mejor solución de algunos parámetros mediante la simplificación de la realidad.

Se utilizan saltos en el tiempo, pero estos no necesariamente tienen que ser constantes. Se quiere reportar el momento en el que se pasa de una actividad a otra, ese momento se denomina golpe de reloj (Facultad de Ingeniería - Universidad de la República, 2022).

En este tipo de simulación se cuenta con dos tipos de eventos, los B (Bound event), que son los eventos seguros y se pueden agendar ya que la ocurrencia es predecible. Luego se tiene los eventos C (Conditional event), que son los condicionales y ocurren si se cumplen ciertas condiciones. Las actividades generalmente comienzan con un evento del tipo C y terminan con un evento del tipo B.

Se detallan a continuación los conceptos de la SED, ya que son de necesaria importancia al trabajar con este tipo de modelos.

Entidades: Las entidades son elementos que se mueven a través del sistema. Son los actores principales del sistema. En un flujo, pasan por una secuencia de operaciones antes de emerger al final. (por ejemplo, pacientes en un hospital, automóviles en un lavadero de autos, paquetes en una instalación de clasificación, clientes en un restaurante). Pueden estar ocupadas, desocupadas o en cola.

Recursos: Son elementos que están en el sistema y que se pueden utilizar siguiendo sus debidas restricciones, con una capacidad limitada, actuando como restricciones.

Atributos: Son características que definen a las Entidades y a los Recursos. En general se mantienen constantes a lo largo de la corrida del modelo y se representan con parámetros. Por ejemplo, para el modelado de aviones que ingresan a un aeropuerto los Atributos de las entidades podrían ser Capacidad de carga, Autonomía de vuelo, etc. Para los recursos podrían ser un atributo: Mantenimiento programado, Tiempo entre fallas, Turno de trabajo, etc.

Eventos: Un evento es una ocurrencia que hace cambiar las variables de estado del sistema. Existen eventos agendados que tienen ocurrencia predecible y eventos condicionados, que su ocurrencia depende de condiciones anteriores. Ejemplos de eventos pueden ser llegada de un cliente o finalización de algún servicio.

1.3 Metodología para aplicar SED:

Previo a realizar cualquier modelo de simulación de sistemas, se debe tener claro cuál es el propósito del modelo que se llevará a cabo, ya que los modelos, sus variables de decisión, sus parámetros y otros elementos varían según los objetivos que se tienen sobre el mismo.

Cuando la SED es aplicada a un sistema se recomienda aplicar una metodología que sea concisa y logre resultados adecuados. La primera etapa consiste en la recolección de datos. La cual, dependiendo del sistema, suele ser la más compleja ya que es la que tiene más

incertidumbres. Una vez que se tiene el análisis de los datos requeridos se prosigue a modelar el sistema incorporando todas las restricciones que este posee. Luego se continúa con la etapa de validación y verificación para poder certificar que los resultados obtenidos se ajustan con la realidad a modelar (Tanantong et al., 2022).

1.3.1 Recolección de datos.

Se debe estudiar el sistema al cuál se le quiere aplicar SED y recopilar cuáles son los datos necesarios para realizarla.

Durante la recolección de datos, es esencial asegurarse de que la fuente de los datos sea confiable y precisa. En ocasiones, puede ser difícil obtener todos los detalles necesarios de los datos requeridos, lo que puede afectar la calidad del modelo. En tales casos, se pueden aplicar metodologías estadísticas para completar los datos y obtener el conjunto de datos deseado para la modelización. Por lo tanto, es importante asegurarse de que los datos sean completos y precisos antes de proceder a la siguiente etapa del proceso de modelización.

Una metodología de parametrización adecuada al conjunto de datos del que se parte es primordial, ya que el margen de error del modelado con respecto a la realidad puede llegar a crecer si no se elige la adecuada. Se tiene que hacer un estudio muy minucioso de las técnicas a aplicar. Otra posibilidad es no tener alguno de los datos necesarios para el modelado, es aquí en donde se pueden llegar a hacer análisis de observación para obtenerlos. No obstante, en varias oportunidades el sistema a modelar no existe o el estudio de este podría llevar un largo tiempo por lo que no sería correcto trabajarlo de esta manera.

A continuación, se analizan estudios en los que se realizó la recolección de datos para aplicar SED:

En el caso de (García-Vicuña & Mallor, 2021) se realiza un estudio en donde se aplica la simulación para poder predecir cuáles son los recursos necesarios durante una pandemia. Para este caso se cuenta con una baja cantidad de datos de entrada ya que para cada pandemia el comportamiento de la gente no tiene por qué ser el mismo, y no se puede utilizar datos históricos del hospital como adecuados a la simulación.

Es entonces que proponen la aplicación de parametrizaciones de manera de poder obtener los datos necesarios. Aplican el modelo Gompertz el cual permite modelar la cantidad de casos positivos acumulativos y la cantidad de hospitalizaciones requeridas. La aplicación de esta parametrización permite obtener datos de entrada al utilizar en una estimación no homogénea de Poisson.

Se propone realizar una estimación para poder tener información necesaria para simular el flujo y el tiempo de espera de los pacientes. Debido al alto grado de variabilidad que se tiene dentro de los hospitales durante una pandemia se optó simularlos mediante la recolección de datos durante el tiempo que haya transcurrido la pandemia que se quiere simular.

Al tomar datos de pacientes que están hospitalizados se toma una probabilidad dependiendo de donde se encuentre el paciente. Se hace una distinción si el paciente se encuentra en la sala de emergencias o si entró a cuidados intensivos. Luego realizan las combinaciones posibles por las que un paciente puede transcurrir y utiliza la parametrización de máxima verosimilitud para estimar los tiempos de espera de los pacientes.

Analizando el caso (Tanantong et al., 2022) en donde se aplica una simulación de un modelo dentro de un hospital público en Tailandia enfocándose en las salas de entrada al mismo. Se

recolectó la información del flujo de pacientes mediante marcas de tiempo predeterminadas en la llegada de estos al hospital. Además, se incluyó la toma de tiempo de su pasaje por la fila para recibir un ticket con el cual van a ser atendidos. Para la estimación de los tiempos implementaron la distribución triangular.

1.3.2 Creación de modelado.

Al momento de realizar el modelado se debe tener en cuenta varios aspectos. El primero es el tener bien definido cuál es el modelo conceptual. Sin tener bien claro que es lo que se quiere modelar probablemente lo modelado no se ajuste a la realidad.

Cuando se modela no se toman en cuenta todos los factores si no que algunos se simplifican y se asumen ciertos aspectos los cuales también deben de estar documentados para poder entender mejor los resultados del modelado. Se deben tener bien definidos cuáles son las entradas y para las salidas que tipo de datos es que se quiere obtener.

Prosiguiendo con el caso de estudio de los hospitales públicos en Tailandia. Para la realización del modelado se utilizó el software Arena Simulation. En el modelado se crea una entidad para representar a un paciente que ingresa al hospital. Esta incluye información relativa al tipo de paciente, la hora de llegada y el estatus del paciente. Se toma la primera decisión que implica que camino debe continuar el paciente dependiendo de qué tipo de paciente sea.

El flujo de pacientes se determina mediante la utilización de un software Input Analyzer en donde determina la probabilidad de pertenecer a determinado tipo de pacientes. Este flujo se puede ver como el tiempo entre llegadas de pacientes para lo cual se utiliza una distribución exponencial (Tanantong et al., 2022).

Analizando el caso de estudio de la sala de emergencia de Prisma (Vishnunarayan, et al., 2021) utilizaron un sistema híbrido de simulación en donde representan a los pacientes y al personal como atributos únicos. En esta simulación logran incluir el nivel de necesidad de atención y el tiempo de llegada de los pacientes. También se realiza un análisis del flujo del personal de manera de poder estudiarlo y tener un tiempo estimado de cuánto les lleva cada tarea. De esta manera se puede tener en cuenta la capacidad de atención del hospital, si sobran camas o si el paciente debe esperar a ser atendido.

1.3.3 Validación y verificación.

Luego de realizado el modelado es necesario validarlo, es decir que funciona correctamente y que sus resultados no sean aleatorios para el mismo tipo de entrada de datos. Hay varias formas de validar los resultados obtenidos, una de ellas es utilizar el método Welch. Se puede correr el sistema más de una vez con los mismos datos de entrada, y hacer pequeñas variaciones de los inputs para ver cuánto varían los outputs.

Se puede empezar la validación con datos de entrada triviales para ir corroborando que el modelado funciona bien. Para la verificación se pueden tomar muestras pequeñas de casos reales o tener entrevistas de cómo se suele comportar el sistema y confirmar si son adecuados los datos a la realidad.

Para el caso de estudio de dos emergencias en Toronto, Canadá (Doudareva & Carter, 2021) se validaron los resultados de la simulación con la confirmación del personal del hospital, es decir que se acercaban a la realidad. Luego se realizaron cambios porcentuales a los datos de entradas para ver cómo se comportaba el modelo ante ellos. Midieron que, si se cambiaban un

porcentaje menor ciertos datos de entrada, lo de la salida no se veían altamente modificados, de esta manera pudieron probar la estabilidad del modelado.

1.4. Optimización

La optimización es un proceso que busca encontrar la solución óptima de un problema determinado, ya sea minimizando o maximizando una función objetivo. La solución óptima satisface todas las restricciones impuestas y a su vez maximiza o minimiza la función objetivo. En otras palabras, es la solución que produce el mejor resultado posible dentro de las limitaciones del modelo (Facultad de Ingeniería - Universidad de la República, UC: IIO, 2022).

Se trabaja mediante el análisis y modelado matemático del sistema. Dentro del modelo matemático hay varias ramas como ser la programación lineal, la no lineal, la programación entera, programación dinámica.

Por otra parte, la simulación con optimización es una técnica de modelado que implica la creación de un modelo matemático de un sistema, y la aplicación de técnicas de optimización para determinar los valores óptimos de las variables de entrada que maximicen o minimicen una función objetivo específica. En otras palabras, la simulación con optimización combina los métodos explicados en 1.2 y 1.3, utilizando la simulación para predecir el comportamiento de un sistema bajo diferentes condiciones y la optimización para encontrar según estas distintas condiciones, la configuración de valores de entrada con la mejor predicción (Bank et al., 2005).

Siguiendo con los conceptos explicados en Bank et al. (2005), se explica que el uso de la optimización en simulación puede presentar ciertas limitaciones. Por ejemplo, la definición de los objetivos de la optimización y la selección de variables de decisión pueden tener un impacto significativo en los resultados de la simulación, por lo que deben ser cuidadosamente evaluadas y validadas. Además, las técnicas de optimización pueden ser computacionalmente costosas, especialmente para modelos complejos, lo que puede aumentar significativamente el tiempo de procesamiento y los recursos necesarios para la simulación.

En conclusión, aunque la optimización en simulación puede ser una herramienta valiosa para la exploración de diferentes escenarios y la toma de decisiones informadas en una variedad de aplicaciones, es fundamental considerar cuidadosamente sus limitaciones y consideraciones antes de aplicarla en el contexto de la simulación.

2. Estado del Arte de simulación y optimización aplicadas a la logística hospitalaria

Al momento de querer implementar algún cambio en un sistema se pueden aplicar previamente los conceptos de simulación y optimización, debido a que permiten evitar la aplicación del cambio directamente en el ambiente de ejecución, sino que se logra hacer un análisis previo, luego de la validación y verificación para aplicarlo en el sistema real.

Por otra parte, el hecho de aplicar simultáneamente la simulación y la optimización permite no solo comprender cómo opera el sistema, sino también detectar posibles problemas como tiempos de espera excesivos o recursos sobreexigidos, así como evaluar cómo afectaría la aplicación de nuevas estrategias. Además, a través de la optimización, se logra no solo analizar el futuro del sistema, sino también mejorar las posibles configuraciones encontrando soluciones óptimas.

Aplicando esto al sector de la salud, en todos los casos, se intenta mejorar las prácticas actuales y poder encontrar formas de disminuir el tiempo de reacción y mejorar la experiencia de los pacientes. Se muestran a continuación distintos ejemplos de aplicaciones en simulación y optimización a la logística hospitalaria.

2.1. Simulación de eventos discretos aplicada al análisis de la demanda con foco en las unidades de emergencia de los hospitales.

En esta sección se quiere dar relevamiento a la literatura en la que se aplica simulación en las emergencias de centros hospitalarios analizando la demanda que tienen estos sistemas.

Como se mencionó en la sección 1.2, la SED es una técnica de investigación de operaciones que se utiliza para simular el comportamiento de sistemas complejos y crear modelos que representen fielmente la realidad, incorporando restricciones y entidades con atributos específicos (Zhang et al., 2008). Esta técnica se aplica para analizar la complejidad del sistema en su totalidad. Una vez aplicada, es posible combinarla con técnicas de optimización para obtener resultados que permitan prever el futuro del sistema y, al mismo tiempo, definir las configuraciones actuales óptimas cumpliendo con las restricciones impuestas.

Esta sección se enfoca en analizar distintos trabajos que estudian cómo reacciona el sistema ante cambios de demanda a través de la aplicación de las técnicas de simulación en las salas de emergencia, entre estos se incluyen los casos en los que se varía el flujo de pacientes y se estudian los efectos que esto genera en los sistemas. Con esto se pueden ubicar los puntos más críticos que se deben mejorar, en su gran mayoría se enfocan en los tiempos de estadía y los tiempos de espera de los pacientes (Yousefi et al., 2020)

Existen distintos métodos para simular la variación de la demanda en las salas de emergencia, dependiendo del objetivo que se quiera alcanzar. Por ejemplo, la simulación puede utilizarse para evitar crisis futuras mediante un plan de acción, como se muestra en el caso de Tavakoli et al. (2022). La simulación resulta conveniente en situaciones de tiempo reducido y cuando el costo de generar la simulación es menor que el costo de ejecutar el proyecto y que éste falle. En este caso, se utilizó el software Arena y el modelo SARIMA (Seasonal Auto-Regressive Integrated Moving Average) para predecir la llegada de pacientes durante un periodo de 30 días. Luego, se evaluaron diferentes escenarios mediante un DEA (Data Envelopment Analysis).

En el estudio de la planificación y agenda de una sala de operaciones realizado por Vali-Siar, et al. (2018), se utilizó un modelo de programación lineal entera mixta para optimizar el proceso. Además, se emplearon tanto un método metaheurístico como un enfoque heurístico para mejorar la eficiencia de la solución.

Siguiendo con el trabajo de Tavakoli et al. (2022), en él se propone la aplicación de varios escenarios, mediante el método Taguchi, para variar las variables de entrada. Se llevó a cabo una simulación con un nivel altísimo de llegada de pacientes para predecir los posibles cuellos de botella dentro del flujo de pacientes. La simulación se realizó utilizando Arena simulation. Dado que se contaba con 11 variables de entrada, se utilizó el método Taguchi, específicamente arrays ortogonales para 11 factores de nivel 3, lo que sugiere la necesidad de estudiar 27 escenarios.

Para predecir la llegada de pacientes al hospital, se utilizó el modelo SARIMA basándose en datos históricos de llegada de pacientes. Con el fin de obtener la mejor predicción posible, se optimizaron los valores de entrada del modelo SARIMA mediante Grid Search, explorando las diferentes combinaciones de valores utilizando los valores de Akaike information criterion (AIC). Es importante señalar que este estudio se realizó en un hospital de Irán que brinda servicios de atención a pacientes con COVID-19.

Siguiendo con el análisis de la literatura se quiere analizar el estudio realizado por Barros et al., (2021) en el que se estudia el análisis de la estimación de la demanda y la capacidad de gestión en servicios de emergencia hospitalaria. El estudio se realizó en tres hospitales de Chile en donde la lógica de la investigación incluye el análisis de la demanda, la cantidad de recursos disponibles y una simulación estocástica para asesorar en la actuación de diferentes secciones.

También se menciona que para poder brindar un mejor servicio a los pacientes es necesario mejorar el servicio en términos de tiempo de espera. En los hospitales de caso de estudio se tiene que el tiempo de espera excede una hora por lo que se debe tener una gran precisión de la estimación del flujo de pacientes, si no se deben tomar decisiones del estilo de transferirlos a otros centros.

En este estudio se opta por el método SVR (Support Vector Regression) y usarlo en combinación con un SED. SVR realiza una regresión lineal, la cual arranca con un set de datos de entrenamiento y mediante una transformación que lleva generalmente a los datos iniciales a un espacio de mayores dimensiones, y en donde luego se resuelve un problema de optimización aplicado a una función convexa. Para estos casos de estudio se visualiza a modo de ejemplo que la demanda es mayor en el horario diurno, por lo que se pueden reasignar los recursos del nocturno al diurno y mejorar el tiempo de atención.

La SED se utilizó mediante el software Arena y se utilizaron como datos de entrada las distribuciones obtenidas posteriormente al análisis de la demanda con SVR. Luego de realizar la simulación los resultados bajo un intervalo de confianza de 95%, se pudo demostrar que los resultados obtenidos del promedio del tiempo de espera entran en el intervalo de confianza.

Analizando la investigación de Alban et al., 2020 aplicaron un proceso estocástico de simulación para la capacidad de la Unidad de Cuidados Intensivos (ICU en inglés) durante la pandemia del COVID 19. Simularon una unidad de cuidados intensivos para pacientes con y sin pandemia y lograron definir un modelo estocástico de filas de espera, para poder tomar una

mejor decisión sobre transferir un paciente. Para el caso de Kovalchuk et al. (2018) mencionan que usaron simulación para el flujo de pacientes para Acute Coronary Syndrome (ACS) y lo combinan con machine learning para poder identificar la clasificación de los pacientes y mejorar el tiempo de espera de estos. Para el caso de Ardabili SF, et al., 2020, también aplicaron machine learning (ML) para predecir las olas de de Covid 19. Usaron Multy-layered Perceptron (MLP) y luego también usaron ML, y estas técnicas resultaron tener menos errores para la predicción.

En el estudio de Fun et al. 2022, se evaluaron los efectos de cambiar el tiempo de inicio de la consulta y la llegada de los pacientes en una clínica de Obstetricia y Ginecología (O&G) en un hospital público en Malasia, donde el sistema de salud es una mezcla de público y privado. Para llevar a cabo este análisis, se utilizó un modelo de simulación basado en el método de Eventos Discretos (SED), utilizando información obtenida de la clínica O&G. Se construyó un modelo DES utilizando el software FlexSim Healthcare, y para la atención de los pacientes se implementó un sistema FIFO (primero en entrar, primero en salir). Se realizaron un total de 30 réplicas para obtener una distribución normal utilizando el teorema central del límite. La validación del modelo se llevó a cabo a través de discusiones con las partes interesadas. Luego, se llevaron a cabo varios escenarios para entender los efectos de cambiar la hora de inicio de la atención y la hora de llegada de los pacientes, con el objetivo de reducir el tiempo de espera y disminuir el número de pacientes en la clínica. Los resultados sugieren que adelantar la hora de inicio de la atención ayuda a reducir los tiempos de espera, especialmente en el tiempo que transcurre entre el registro y la atención médica.

Se llevó a cabo otro estudio en un hospital de Portugal con el objetivo de mejorar el rendimiento de la espera de los pacientes en la sala de emergencias y optimizar la utilización de los recursos, mediante la aplicación de técnicas de simulación (Castanheira-Pinto et al., 2021). El estudio se centró en el análisis del funcionamiento del hospital, prestando especial atención a las tasas de llegada de los pacientes según su tipo, el proceso de admisión y el protocolo de Triage. Además, se realizó un análisis detallado de las bases de datos proporcionadas por el hospital para determinar la demanda del hospital según el tipo de pacientes en diferentes días de la semana. Los resultados mostraron que el lunes era el día con mayor demanda y que había dos horarios con mayor afluencia de pacientes: de 8 a 10 de la mañana y de 2 a 4 de la tarde.

Para la simulación se utilizó Simio Software, y la validación se hizo comparando los valores de la simulación con valores reales del procesamiento de datos. Los resultados revelaron diversas oportunidades de mejora, siendo principal la dependencia de los especialistas en la disponibilidad de camas, lo que afectaba directamente la eficiencia de la sala. En función de esto, se determinó la cantidad de salas necesarias para garantizar una disponibilidad adecuada, analizando la capacidad en función del tipo de paciente y la necesidad de reubicación de camas y recursos humanos, lo que implicó la reubicación de camas del sector verde (menos grave) al amarillo (gravedad media).

Una conclusión importante es que el diseño adecuado de la capacidad de la habitación no solo depende del porcentaje de pacientes con determinada prioridad, sino también de la severidad de la prioridad. Además, dado la complejidad y no linealidad del departamento de emergencias, un enfoque de simulación de eventos discretos es capaz de modelar correctamente la dinámica del sistema y las Inter correlaciones, lo que permite un diseño adecuado tanto del tamaño de las habitaciones como del equipo médico. Es importante tener

en cuenta que el modelo debe considerar dos factores, no solo la capacidad asignada al tipo de paciente, sino también la gravedad del paciente y el porcentaje que representa en el total de entradas.

Por último, es importante mencionar que cada cambio propuesto por los autores fue implementado en práctica por parte de la dirección del hospital. La simulación de eventos discretos ha demostrado ser efectiva para determinar el comportamiento de escenarios alternativos sin ser implementados a escala completa. La flexibilidad asociada con la simulación representa una de las mayores ventajas en su adopción ya que permite la toma de decisiones informadas y estudiadas previamente.

2.2. Aplicaciones de simulación de eventos discretos para la planificación de recursos en salas de emergencia de los hospitales

En esta sección, se presentan los artículos relacionados con la planificación de recursos en las salas de emergencias de hospitales. Este tipo de estudios se enfoca en simular el comportamiento de los distintos recursos disponibles, para posteriormente determinar cuellos de botella, patrones y mejorar la utilización de estos, independientemente de su categoría.

En algunos casos, como el de Zheng et al. (2022), se ha llevado a cabo un análisis y una simulación con el objetivo de comprender el impacto de la cantidad de empleados, sus turnos y políticas de control en la mejora del servicio. En esta investigación, se utilizó el software SED para modelar el flujo de una sala de emergencia en un hospital terciario de Beijing, China, y se aplicaron distribuciones estáticas mediante StatFit para modelar los tiempos de proceso. Además, para simular el flujo en 21 salas de operación se utilizó el software AnyLogic, llevando a cabo la simulación durante un total de 66 días. La validación de los resultados se realizó mediante la comparación de los datos proporcionados por el hospital, principalmente el tiempo de espera y la utilización de las salas de operación. En este caso, se utilizó la simulación para estudiar el impacto del aumento en la demanda y se llegó a la conclusión de que, mientras las salas de emergencia están completamente ocupadas durante el día, se incrementa notoriamente el número de cirugías, mientras que el tiempo de espera se ve afectado mínimamente.

Otro ejemplo de la aplicación de la simulación para la planificación de recursos se dio en el circuito de hospitales de Nueva York. En este caso, se utilizó la simulación para determinar cuál de las opciones era mejor: utilizar el hospital más cercano o equilibrar la ocupación de los hospitales teniendo en cuenta su capacidad. Se realizó una optimización considerando la opción de equilibrio, minimizando el tiempo total. Este proyecto demuestra la importancia de la simulación y la optimización juntas para mejorar el día a día de los hospitales y aplicar los últimos avances tecnológicos en logística hospitalaria (Larrea et al., 2021).

Además, en la literatura se han reportado otros casos similares. Por ejemplo, Carmen et al. (2018) modelaron la interfaz entre un servicio de urgencias y una sala de hospitalización mediante el uso de cadenas de Markov para modelar las filas de espera y asumir una cantidad limitada de recursos. Se utilizó la teoría de colas para analizar la liberación de ambulancias. En un caso similar, Almehdawe et al. (2013) utilizaron un modelo probabilístico para encontrar la mejor ubicación para colocar las ambulancias. También se utilizó una SED para evaluar la solución analítica y ajustar las estimaciones del modelo, lo que permitió seguir iterando en los algoritmos.

Se presenta el caso de Aboueljinane & Frichi (2022) que evaluó el tiempo de respuesta de las ambulancias mediante el uso de la técnica de SED en el departamento de emergencias utilizando el software Arena. El modelo de simulación y optimización se resolvió con OptQuest de Arena, y se utilizó el recorrido del departamento de emergencias, sistema de ambulancias y la unidad de observación para crear la simulación. El proceso comienza con una llamada al sistema de ambulancias y termina cuando el paciente es dado de alta del departamento de emergencias o de la unidad de observación.

En el proceso del sistema de ambulancias, se evalúa el riesgo después de recibir la llamada del paciente, y se decide si se necesita enviar una ambulancia. Si es necesario, se envía la más cercana disponible. El proceso en el departamento de emergencias comienza con el Triage del paciente, y según el grado de urgencia, se determina su flujo dentro del hospital, departamento de emergencias y unidad de observación. Para aplicar el SED con datos reales, se utilizó una distribución probabilística que mejor se adecuaba a los datos históricos del EMS de un suburbio de París, Francia (Aboueljinane et al., 2014) y otra para el estudio del departamento de emergencias en el hospital Saint Camille de Francia. Para la llegada de pacientes o de llamadas, se utilizaron distribuciones no homogéneas de Poisson (Ghanes et al., 2015).

Este caso demuestra la utilidad de la simulación y optimización para evaluar el tiempo de respuesta de las ambulancias en el departamento de emergencias, lo que puede ayudar a mejorar la eficiencia y eficacia de los servicios médicos de emergencia.

Se validó el SED, asegurándose que el modelo tiene precisión en representar el sistema real. Para ello utilizaron dos técnicas, validez aparente y análisis de sensibilidad. La validez aparente se pudo probar mediante un experto en SED aplicado al sistema de salud. Luego se realizó un análisis de sensibilidad aumentando la tasa de arribo de llamadas y pacientes, en este punto se pudo notar que el sistema se comporta como lo esperado ya que los KPIs de tiempos de espera se ven aumentados (Aboueljinane et al., 2022).

Dentro de las técnicas de simulación una de ellas es la técnica de coloreo de red de Petri, es el caso de estudio de los flujos de una emergencia descrito por Barakaou et al. en 2002. En el mismo nos describen al sistema CPN (Colred Petri Nets), por sus siglas en inglés como una manera visual de poder simular sistemas de distribución en los cuales es importante la comunicación, el sincronismo y la interconexión. Describen que cuentan con una manera de poder entender los flujos naturalmente. Toman elementos gráficos y los definen como ciertos componentes de un flujo (Ghelot et al. 2021). Dentro de este estudio se utiliza el sentido de tokens para poder identificar la cantidad de recursos que tengo disponibles de manera de poder avanzar con el flujo hasta que tenga una etapa final o que la próxima etapa tenga al contador del token en cero. Se puede observar la fácil aplicación del movimiento que tiene un flujo de pacientes que necesitan ser atendidos en una sala de cirugías.

Se destaca que el modelado original no contaba con una jerarquía, para este caso muestran que es posible modelar sistemas para los cuales se puede dar una jerarquía. Indican que se puede realizar una red jerárquica basándose en la idea de que cada estación dentro del flujo puede ser subdividida en varias ramas. De esta forma logran obtener detalladamente los posibles flujos que puede tener un paciente dentro de la sala de emergencia de un hospital. Le

suman que se puede implementar más información dentro de los tokens por ejemplo ampliar en las condiciones de los pacientes o el tipo de salas y sus recursos que se encuentran disponibles.

Sobre el punto de la colección de datos y de los resultados explican que aplicar CPN facilita el monitoreo de la performance del sistema, se puede centrar el estudio en un tipo de estudio que sea de interés. Utilizan estos monitores para poder obtener datos durante una simulación y poder realizar un reporte de análisis estadísticos de las mismas. Realizaron estos estudios teniendo un flujo moderado y alto de llegada de pacientes. en donde pudieron mostrar que la utilización del personal de las salas anestésicas y de recuperó eran bajas por lo que se podría asignar el personal según su capacidad para disminuir cuellos de botella.

Se tiene como resultados que el modelado aplicado a las salas de espera de emergencia es de gran utilidad ya que en los últimos tiempos se ha visto una alta demanda por parte de los pacientes. Sobre la aplicación de CNP una manera más sencilla de explicar y amigable de explicar a las partes interesadas la simulación. Además, destacan que se cuenta con herramientas de software gratuitas con un nivel muy bueno para el análisis gráfico.

2.3. Optimización de la gestión de recursos en salas de emergencias hospitalarias y tiempos de espera de los pacientes.

El uso de la simulación como una herramienta para optimizar sistemas se relaciona directamente con la alta demanda que experimentan las salas de emergencia de los hospitales. El primer paso en la optimización mediante simulación consiste en el análisis del sistema y la recolección de datos, seguido del desarrollo y validación del modelo de simulación. Después, es necesario seleccionar el método de optimización (Yousefi et al., 2020).

En esta sección, se presenta la investigación llevada a cabo por Tanantong (2022), que utiliza una optimización multiobjetivo con varios fines, tales como mejorar los costos totales, la experiencia de los pacientes, reducir los tiempos de espera, mejorar la eficiencia de todos los recursos y aumentar el beneficio total del hospital como empresa.

Para la simulación, se modeló la situación actual según los tipos de pacientes, ya que los diagramas de flujo para cada uno son distintos y requieren decisiones específicas. Los pacientes se clasificaron en cuatro grupos: 1. Pacientes sin cita previa, 2. Pacientes del personal o estudiantes, 3. Pacientes no registrados y 4. Pacientes con privilegios gubernamentales.

Se estudiaron las distribuciones según el tipo de paciente y las horas de llegada, así como también cómo calificaron el servicio. Además, se estimaron los tiempos de llegada de los pacientes de todos los tipos a través de una distribución exponencial. La llegada de los pacientes para la simulación se dividió en cuatro etapas: ingreso, Triage, registros médicos y salida.

Para validar la simulación, se utilizó OptQuest en conjunto con el modelo de optimización para encontrar las necesidades óptimas de recursos para el hospital. Como resultado, se alcanzaron los estados óptimos para la satisfacción de los pacientes con una cantidad de recursos determinada. Desde el punto de vista del hospital, se optimizó la cantidad de personal, ya que era lo que más les convenía económicamente y se entendió que estaba correlacionado con el

tiempo de espera. Además, se desarrolló un algoritmo que ayuda en la toma de decisiones en el hospital y reduce el riesgo de cometer errores al dar diagnósticos.

Otro estudio de interés es el caso de Vishnunarayan et al. (2021) el cual se enfoca en optimizar y simular el flujo de llegada de pacientes y la respectiva asignación de recursos (y repeticiones), tanto de profesionales como de camas disponibles, en Health Greenville Memorial Hospital, Estados Unidos.

Según los estudios que realizaron, un especialista visita los pacientes de mayor riesgo unas 4 veces, los del segundo nivel según el riesgo 3 veces y así sucesivamente. A su vez, también se explica que solo el del 15 al 30% del tiempo de la estadía del paciente se dedica a la consulta de un especialista, el resto del tiempo son evaluaciones, espera, Triage, entre otras actividades. Como objetivos principales se tuvo identificar la cantidad de staff necesario, reducir los tiempos de espera y a su vez los costos totales del hospital.

Para el análisis de datos, se estudiaron las llegadas por hora y por día, y la ocupación de camas, según gravedad y comparado con lo que el hospital tiene de por sí reservado para ese tipo de pacientes. En cuanto a la validación, se utilizaron datos reales de espera, de cantidad de empleados necesarios según el modelo y la cantidad real que se utilizan, Para la optimización se tuvo en cuenta, que paciente es atendido por especialista, la hora de cambio de los especialistas, la disponibilidad por hora, y el número de visitas que el paciente está realizando.

Se tienen distintas restricciones, como son la cantidad máxima de veces que un especialista visita a un paciente, la cantidad de camas disponibles, se debe visitar al paciente que visita por primera vez con prioridad, la cantidad de pacientes que un especialista visita, las visitas de los especialistas deben hacerse de manera completa una vez que se comienzan, la cantidad total de especialistas topeada según el presupuesto del hospital y por último, que siempre comienzan una sola vez su turno al día.

Se llegó a que se podría reducir el tiempo de espera en un 27% aplicando las mejoras propuestas. Este estudio es un gran avance en cuanto a mejoras en salas de emergencia, sin embargo, implementar estas políticas en distintos hospitales dependerá de las llegadas de sus pacientes y el costo de los médicos de personal, como estos son factores críticos que afectan el cronograma.

Para finalizar con esta sección, el análisis de Vishnunarayan et al., 2021 realiza el modelo matemático del control de turnos del personal utilizando la metodología de programación lineal entera mixta (MILP). Se quiere optimizar la cantidad necesaria de personal en relación con la cantidad de pacientes. En este caso se tuvieron en cuenta todas las restricciones del problema como puede ser la cantidad de pacientes que puede atender un médico especializado, la cantidad de camas disponibles entre otros aspectos.

2.4. Conclusiones

Después de haber realizado un análisis de la literatura, se puede concluir que:

Las técnicas de simulación a eventos discretos tienen una gran relevancia en la aplicación de la logística hospitalaria. Son muy útiles para estudiar los tiempos que los pacientes pasan en el área de emergencias. Al aplicar métodos de optimización en conjunto con simulación, se pueden encontrar configuraciones que reduzcan los tiempos de espera de los pacientes, lo que tiene un gran impacto en el rendimiento del sistema. Esto puede llevar a una mejora en la

experiencia del usuario en la emergencia, independientemente de la categoría del Triage, siempre se está en la sala de emergencias por una situación poco placentera.

Por otra parte, se pudo realizar una descripción detallada de la logística hospitalaria y los centros más críticos dentro de un hospital. En los artículos estudiados, se validó la simulación, lo que demuestra que es factible su aplicación en lugares críticos y ocupados como las salas de emergencia de un hospital.

Referencias

Aboueljinane, L. & Frichi, Y., 2022. *A simulation optimization approach to investigate resource planning and coordination mechanisms in emergency systems*. Simulation Modelling Practice and Theory., 119(102586).

Aboueljinane, L., Sahin, E. & Jemai, E., 2013. *Emergency ambulance deployment in Val-de-Marne department: a simulation-based iterative approach*. International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications, pp. 565–576..

Allaire, G., 2007. *Numerical Analysis and Optimization*. pp. 277-292.

Almehdawe, E., Jewkes, B. & He, Q., 2013. *Queueing model for ambulance offload delays*, Eur. J. Oper. Res. 226(3), 02–61.

Anylogic, 2023.

Disponible en: <https://www.anylogic.com/>
[Último acceso: Marzo 2023].

Arena, 2023. *Arena Simulation Software*.

Disponible en: <https://www.rockwellautomation.com/en-us/products/software/arena-simulation.html>

[Último acceso: Marzo 2023].

Aristimuño, I., Larzábal, V. & Silvera, M., 2021. *Modelado y simulación para problemas de gestión logística: Una aplicación a la Gestión Hospitalaria*. Informe Final Proyecto de grado, Universidad de la República.

Banks, J., Carson, J., Nelson, B. & Nicol, D., 2004. *Discrete-Event System Simulation*. pp. 60-77.

Barros, O., Weber, R. & R. C., 2021. *Demand analysis and capacity management for hospital emergencies using advanced forecasting models and stochastic simulation*, Operations Research Perspectives, 8 (100208).

Becerra, M., Herrera, M., Trejos, C. & Romero, O., 2021. *Resources Allocation in Service Planning Using Discrete Event Simulation*. Ingeniería y Universidad, 25(1), pp. 1-22.

Carmen, R. Van Nieuwenhuysen, I., & Van Houdt, B., 2018. *Inpatient boarding in emergency departments: impact on patient delays and system capacity*. Eur. J. Oper. Res., 271(3).

Castanheira-Pinto, A., Gonçalves, B., Lima, R. & Dinis-Carvalho, 2021. *Modeling, Assessment and Design of an Emergency Department of a Public Hospital through Discrete-Event Simulation*., 11 (2), pp. 1-25.

Checkland, P., 1981. *Systems Thinking, Systems Practice*. pp. 30-59.

Chen, R., R. Sharman, H. & Rao, S. U., 2008. *Coordination in emergency response management*. Commun. ACM 51(5), pp. 66–73.

Concannon, K., 2007. *Simulation Modeling with Simul8*.

Curso Ingeniería de Software, 2008. *EVA - FIng - UdelaR*.

Disponible en:

<https://www.fing.edu.uy/tecnoinf/maldonado/cursos/ingsoft/materiales/teorico/is09-Verificacion-Validacion.pdf>

[Último acceso: Abril 2023].

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. & Meyarivan, T., 2002. *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation., 6(2), pp. 182-197.

Doudareva, E. & Carter, M., 2021. *Using Discrete Event Simulation To Improve Performance At Two Canadian Emergency Departments*.

Facultad de Ciencias Económicas y de Administración - Universidad de la República, 2011.

Camaño, Gabriel; Goyenche, Juan José. Disponible en:

<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/10558?mode=full>

[Último acceso: Setiembre 2023].

Facultad de Ingeniería - Universidad de la República, 2022. *Mauttone, Antonio Notas UC: Simulación a Eventos Discretos (SED)*.

Disponible en: <https://eva.fing.edu.uy/mod/forum/view.php?id=117407>

[Último acceso: Diciembre 2022].

Facultad de Ingeniería - Universidad de la República, 2022. *Notas UC: Introducción a la investigación de operaciones (IIO)*.

Disponible en: <https://eva.fing.edu.uy/enrol/index.php?id=994>

[Último acceso: Diciembre 2022].

Figuerola, L., Aguirre, S. & Whilches, M., 2016. *Análisis de la Logística Hospitalaria aplicada en las Entidades de Salud de Nivel 3 y 4 en la ciudad de Barranquilla*. Scientia Et Technica, 21(4), pp. 307-317.

FlexSim, 2023.

Disponible en: <https://www.flexsim.com/es/flexsim/>

[Último acceso: Mayo 2023].

Fun, W. 2022. *Applying Discrete Event Simulation to Reduce Patient Wait Times and Crowding: The Case of a Specialist Outpatient Clinic with Dual Practice System*. Healthcare (Basel), 10(2), pp. 189.-190.

Garcia-Vicuña, D. & Mallor, F., 2021. *Improving Input Parameter Estimation in Online Pandemic Simulation*. Proceedings of the 2021 Winter Simulation Conference.

Gehlot, V. y otros, 2021. *For Healthcare Professionals: A Colored Petri Nets Based Approach For Modeling And Simulation Of Healthcare Workflows*. Proceedings of the 2021 Winter Simulation Conference.

Ghanes, K., 2015. *Simulation-based optimization of staffing levels in an emergency department*. Simulation 91 (10) 942–953.

GoldSim, 2023.

Disponible en: <https://www.goldsim.com/Web/Home/>

[Último acceso: Marzo 2023].

Gul, M. & Guneri, A., 2015. *A comprehensive review of emergency department simulation applications for normal and disaster conditions*. Computers & Industrial Engineering, 83(1), pp. 327-344.

- Han, Q., Zeng, L., Liu, Y. & Liu, Y., 2014. *An adaptive clustering algorithm for road abnormal region analysis*. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 36(1), pp. 88-98.
- Hassan, T., 2006. *Logistique hospitalière : organisation de la chaîne logistique pharmaceutique*.
- HC, 2023. *Hospital de Clínicas*.
Disponible: <https://www.hc.edu.uy/index.php/el-hospital>
[Último acceso: Febrero 2023].
- Huang, S., Fu, Z., Liu, C. & Li, J., 2023. *Multi-objective optimization of fiber laser cutting quality characteristics of glass fiber reinforced plastic (GFRP) materials*. Optics & Laser Technology, 167(1).
- Hu, M., 2017. *A high-fidelity three-dimensional simulation method for evaluating passenger flow organization and facility layout at metro stations*. Simulation, 93(10), pp. 841-851.
- ISTQB, 2023.
Disponible en:
https://glossary.istqb.org/en_US/search?term=verification&exact_matches_first=false
[Último acceso: Mayo 2023].
- Joskowicz, R. E. a. L., 2023. *Verification, Evaluation, and Validation: Which, How & Why, in Medical Augmented Reality System Design*. Journal of Imaging, 9(2), pp. 20-21.
- Jun, J., Jacobson, S. H. & Swisher, J. R., 1999. *Application of Discrete-Event Simulation in Health Care Clinics: A Survey*. The Journal of the Operational Research Society, 50(2), pp. 109–123.
- Kamarudeen, N., Sundarakani, B. & Manikas, I., 2020. *An Assessment of the Dubai Metro Service's Performance Using SCOR Model and ARENA Simulation*. FIIB Business Review , pp. 9(3) 167–180.
- Kovalchuk, S., Funkner, A., Metsker, O., Yakovlev, A. ,2018. *Simulation of patient flow in multiple healthcare units using process and data mining techniques for model identification*. JBiomed Inform, 82(1), pp. 128–142
- Larrea, L., Lam, E. & Sanabria, E., 2021. *Simulating New York City Hospital Load Balancing During Covid-19*. Winter Simulation Conference.
- Law, A. M., 2013. *Simulation modeling and analysis*. pp. 1-78.
- Lim ME, N. T., 2012. *Mathematical modeling: the case of emergency department waiting times*. Int J Technol Assess Health Care 2012; 28(2): 93–109.
- Maidstone, R., 2012. *Discrete Event Simulation, System Dynamics and Agent Based Simulation: Discussion and Comparison*, : The University of Manchester.
- Meara, J. G. & Greenberg, S. L., 2015. *The lancet commission on global surgery global surgery 2030: Evidence and solutions for achieving health, welfare and economic development*. Global Surgery, 157(5), pp. 834–835.
- Mohamed, I., 2020. *A Discrete Event Simulation Model for Waiting Time Management in an Emergency Department: A Case Study in an Egyptian Hospital*. International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing, 12(1).

- Muñoz, A., 2020. *El Claustro de la Facultad de Medicina eligió a Álvaro Villar como nuevo director del Hospital de Clínicas*. La Diaria, 17 diciembre 2020.
- Mustafee, N., Katsaliaki, K. & Taylor, S. J., 2010. *Profiling Literature in Healthcare Simulation*. Simulation, 86(8-9), pp. 543–558.
- PMBOK, 2004. *Guía de los Fundamentos de la Dirección de Proyectos*. Project Management Institute.
- Pooch, U. & Wall, J., 1992. *Discret Event Simulation: A practical approach*. CRC Press, pp. 1-32.
- Privett, N. & Gonsalvez, D., 2014. *The top ten global health supply chain issues: perspectives from the field*. Operations Research for Health Care, 3(4), pp. 226- 230.
- ProModel, 2023.
Disponible en: <http://promodel.com.mx/promodel/>
[Último acceso: Julio 2023].
- Przywara, B., 2010. *Projecting futur health car expenditure at European level: drivers, methodology and main results*. European Economy - Economic Papers, 417(1), pp. 2008-2015.
- Real Academia Española, 2023.
Disponible en: <https://www.rae.es/>
[Último acceso: Marzo 2023].
- Robinson, S., 2004. *Simulation: The Practice of Model Development and Use*. John Wiley & Sons Ltd, pp. 1-12.
- Roza, M., Voogd, J. & Sebalj, D., 2012. *The Generic Methodology for Verification and Validation to support acceptance of models, simulations and data*. Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology, 10(4), pp. 347-365.
- Simio, 2023.
Disponible en [ww.simio-simulacion.es/](http://www.simio-simulacion.es/)
[Último acceso: Julio 2023].
- Simul8, 2023.
Disponible en: <https://www.simul8.com/software/system-requirements#networks>
[Último acceso: Marzo 2023].
- Sommerville, I., 2016. *Software Engineering*. Pearson Education Limited, pp. 226 - 254.
- Tanantong, T., Pannakkong, W. & Chemkomnerd, N., 2022. *Resource management framework using simulation modeling and multi-objective optimization: a case study of a front-end department of a public hospital in Thailand*. BMC Medical Informatics and Decision Making, 22(10).
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Mesbahi, R., Ghanavati-Nejad, M. & Tajally, A., 2022. *Simulation of the COVID-19 patient flow and investigation of the future patient arrival using a time-series prediction model: a real-case study*. European Journal of Operational Research, 302(1), pp. 337-347.
- Vali-Siar, M., Gholami, S. & Ramezhanian, R., 2018. *Multi-period and multi resource operating room scheduling under uncertainty: A case study*. Comput. Inf. Eng., 126(1), pp. 549-586.

- Van der Ham, A., 2019. *Identifying logistical parameters in hospitals: Does literature reflect integration in hospitals? A scoping study*. Health Services Management Research, 32(3), pp. 158–165.
- Villar, H., 2008. *55 años del Hospital de Clínicas “Dr. Manuel Quintela”*. Revista Medica Uruguaya, 24(1), pp. 155-160.
- Vishnunarayan, Prabhu.K. & Taaffe, R., 2021. *Physician Shift Scheduling To Improve Patient Safety And Patient Flow In The Emergency Department”*. Proceedings of the Winter Simulation Conference, 87(1)
- Yousefi, M., Kafash, A. & Khani, A., 2020. *Applying species distribution models in public health research by predicting snakebite risk using venomous snakes' habitat suitability as an indicating factor*. Sci Rep, 10(1).
- Zeinali, F., Mahootchi, M. & Sepehri, M. M., 2015. *Resource planning in the emergency departments: A simulation-based metamodeling approach*. Simulation Modelling Practice and Theory, 53(1), pp. 123-138.
- Zhang, X., 2018. *Application of discrete event simulation in health care: a systematic review*. BMC Health Services Research, 687(18).
- Zheng, H., Wang, Q. & Shen. J., K. Y. a. L. J., 2022 . *Modeling and Analysis of Operating Room Workflow in a Tertiary A Hospital*. IEEE Robotics And Automation Letters, 7(3).

ANEXO 2

1. ACTA DE CONSTITUCIÓN DEL PROYECTO

NOMBRE DEL PROYECTO
Simulación a eventos discretos para el análisis y optimización de tiempos de permanencia en la sala de emergencias del Hospital de Clínicas

AMBITO DE EJECUCION
El proyecto se realizará en la sala de emergencias del Hospital de Clínicas Dr. Manuel Quintela. El local se ubica físicamente en la Av. Italia, 11600 Montevideo, Departamento de Montevideo

OBJETIVO DEL PROYECTO
Aplicar técnicas de simulación con optimización a través de un software en la sala de emergencias del Hospital de Clínicas. A su vez, generar un procesador de datos que permita procesar, generar indicadores de los datos crudos de la sala de emergencias e identificar las restricciones del sistema.

FINALIDAD DEL PROYECTO
La finalidad del proyecto es lograr un simulador con optimización que sea capaz de obtener escenarios que mejoren el tiempo de espera de los pacientes y a su vez lograr un procesador de datos que permita tomar decisiones informadas en la sala de emergencia.

DESCRIPCIÓN BREVE
El proyecto tiene como objetivo aplicar técnicas de simulación con optimización y generar un procesador de datos para analizar y procesar resultados. El proyecto busca encontrar un software confiable que permita simular el sistema, para lograr modelar la situación y a su vez encontrar escenarios que mejoren los tiempos de espera. Los resultados obtenidos serán entregados en forma de informe y los manuales asociados que sean necesarios

BENEFICIOS ESPERADOS

Se espera que el proyecto permita al equipo de gestión del Hospital de Clínicas tomar decisiones informadas tanto para el día a día de la sala como para cambios a futuro sin necesidad de inversión. Decisiones como pueden ser construir otro consultorio, otro espacio de Triage, recorte o aumento de personal o de recursos, cambios en los cronogramas de los médicos y enfermeros, entre otros. Esto a través de: indicadores del procesador de datos, pronósticos de escenarios a través del simulador, simulación de escenarios y optimización de condiciones iniciales a través de técnicas de simulación con optimización.

Se espera que a través de la identificación de las restricciones se logre aplicar mejoras que permitan disminuir el tiempo de espera. Esto puede contribuir a aumentar la eficiencia, disminuir costos y aumentar la productividad.

Brindar un modelo de simulación replicable, confiable y robusto, que pueda seguir siendo utilizado por el equipo de gestión de la sala de emergencia con el paso del tiempo.

Por último, se espera que el proyecto contribuya a la mejora continua de la sala de emergencias, a través los insumos que se entregarán ya mencionados (simulador, procesador de datos) como también a través de recomendaciones de gestión generadas por la unidad ejecutora al finalizar el proyecto.

6. EQUIPO DE TRABAJO DEL PROYECTO

Nombre	Equipo de trabajo	e-mail
Clara López	Unidad ejecutora	
Isabel Rodríguez	Unidad ejecutora	
Antonio Mauttone (INCO)	Tutor	
Pedro Piñeyro (INCO)	Tutor	
José Gorrasi	Hospital de Clínicas	
Irene Retamozo	Hospital de Clínicas	

Fecha de elaboración

25	04	2022
----	----	------

2 DOCUMENTO DEL ALCANCE DEL PROYECTO

En este documento se detalla el alcance del proyecto basado en la metodología propuesta en PMBOK (2004).

Objetivos del Proyecto

Aplicar técnicas de simulación con optimización a través de un software en la sala de emergencias del Hospital de Clínicas. A su vez, generar un procesador de datos que permita procesar, generar indicadores de los datos crudos de la sala de emergencias e identificar las restricciones del sistema.

Entregables del Proyecto

Informe de la simulación con optimización, mostrando todo el proceso realizado, a su vez generar una sección detallando los cuellos de botella identificados y las recomendaciones de la unidad ejecutora al equipo de gestión de la sala.

- Simulador con manual asociado.
- Procesador de datos con manual asociado.

Límites del Proyecto

El proyecto se enfocará exclusivamente en el Departamento de Emergencias del Hospital de Clínicas, excluyendo otros departamentos o áreas del hospital.

El proyecto se limitará a la simulación y optimización de procesos de atención médica, excluyendo otras áreas no relacionadas, como la gestión financiera o la gestión de la internación.

Requisitos del Proyecto

Se deberá contar con acceso a datos históricos de los procesos de atención médica del HC, incluyendo tiempos de espera, cantidad de pacientes atendidos por día y por hora, recursos utilizados (médicos, enfermeros, especialistas, insumos), entre otros.

Se deberá contar con un software de simulación adecuado para llevar a cabo el estudio, así como capacitaciones para su uso.

Criterios de Aceptación

Los entregables del proyecto serán considerados aceptables si cumplen con los objetivos establecidos.

Las técnicas de modelado propuestas serán consideradas aceptables si se basan en datos reales y fundamentos teóricos explícitos.

El simulador será considerado aceptable si se realiza la verificación y validación previamente validada por los tutores.

Las conclusiones serán validadas si logra exponer propuestas que apunten a mejorar los tiempos de espera de la sala de emergencias.

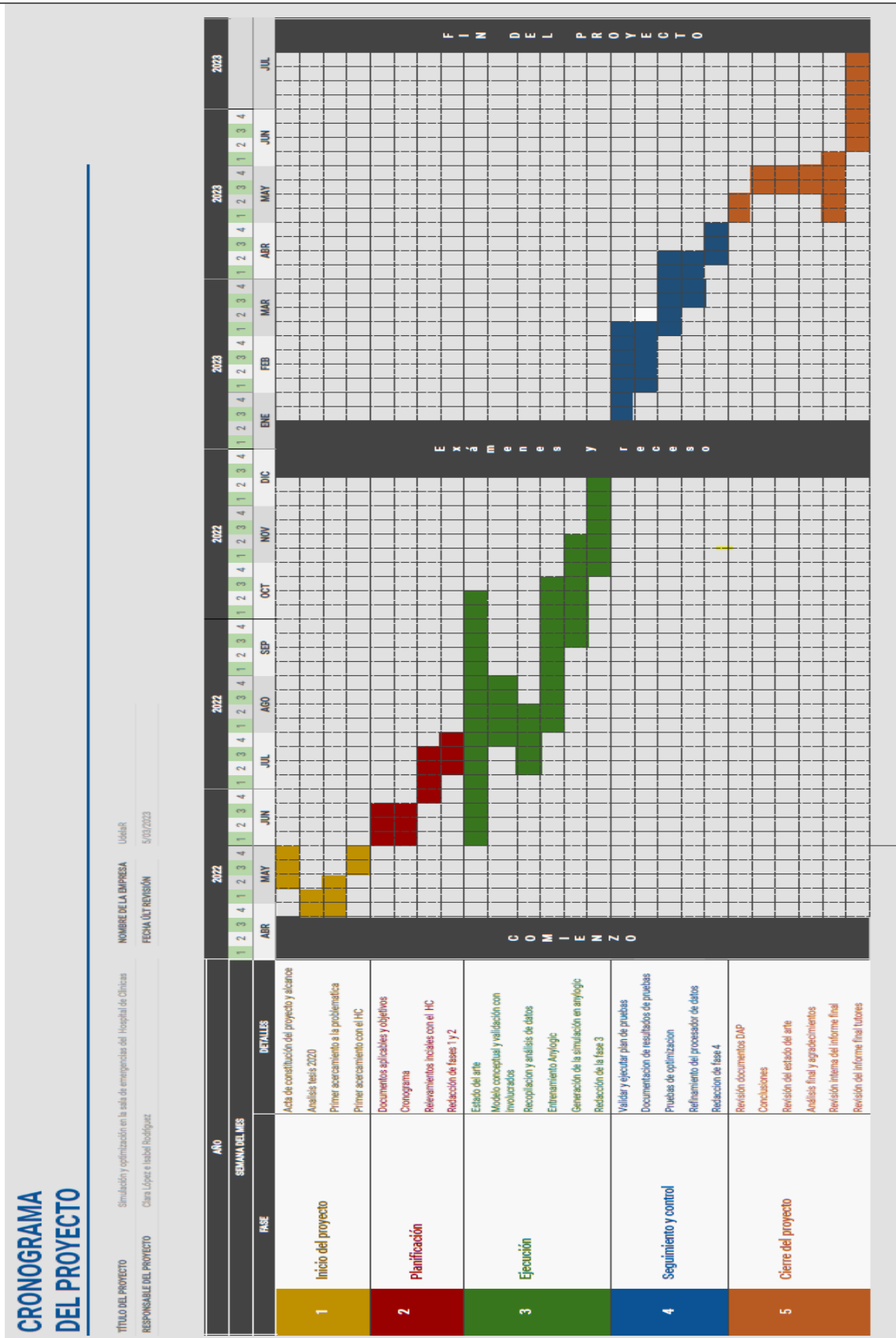
Supuestos del Proyecto

Se asume que se contará con acceso a datos históricos y actuales de los procesos de atención médica del HC para llevar a cabo la simulación y el procesador de datos.

Se asume que se contará con el software necesario para llevar a cabo la simulación y optimización.

Se asume que se obtendrán las autorizaciones necesarias de la Dirección del HC y otras partes interesadas para llevar a cabo el proyecto.

3 CRONOGRAMA DEL PROYECTO



4. DOCUMENTOS APLICABLES AL PROYECTO

Documentos aplicables al proyecto						
Contraparte: Hospital de Clinicas						
Proyecto: Simulación y optimización en la sala de emergencias del Hospital de Clinicas						
Nro.	Código	Documento/fase del ciclo de proyectos	Inicio	Planificación	Ejecución y seguimiento	Cierre
1	A	Acta de constitución del proyecto	Si	No	No	No
1	B	Documento del Alcance	Si	Si	Si	Si
2	C	Cronograma de actividades	No	Si	Si	Si
4	D	Matriz RACI	No	Si	Si	Si
5	E	Matriz de riesgos	No	Si	Si	Si
6	0	Documentos aplicables al proyecto	Si	No	No	No

Durante la ejecución del proyecto, se pueden generar nuevas versiones. Estas nuevas versiones alimentan la gestión del alcance y apoyan la evaluación de cierre

Responsable de aprobación del Registro : Isabel Rodriguez

Fecha 25/04/2022

5 MATRIZ DE RIESGOS

Unidad ejecutora	Proyecto	Isabel Rodríguez			Índice de Riesgo				
	Simulación y optimización en la sala de emergencias del Hospital de Clínicas								
MATRIZ DE RIESGOS		Proceso/Sector	Prob	Impacto	Total	Efecto	Acción preventiva	Disparador	Acción correctora
Descripción breve del riesgo	Descripción más detallada del riesgo							1,75	
Falta de datos	Al momento de ejecutar la simulación, la información necesaria no es suficiente, no es existente o no se pudo proveer por el Hospital de Clínicas o las fuentes consultadas.	Unidad ejecutora	60%	7	4,20	Retrasos en el cronograma	Tener identificada la información que se necesita previo a las reuniones con el HC	Antecedentes de proyectos anteriores	Buscar la información que se necesita utilizando medios no pactados y/o adaptar el modelo a la información proporcionada
Falta de un simulador	No obtener una licencia del software de simulación sin costo o a bajo costo	Unidad ejecutora	70%	6	4,20	Retrasos en el cronograma, imposibilidad de realizar la simulación de forma adecuada al modelo pensado	Buscar distintas posibilidades tanto pagas como no pagas de distintos softwares de simulación que hayan en el mercado	Antecedentes de proyectos anteriores	Pedir ayuda a proyectos que hayan usado softwares de simulación o expertos en el tema
La contraparte deja de participar del proyecto	La contraparte podría darse de baja del proyecto, ya sea por problemas internos o externos a ella	Contraparte	10%	10	1,00	Impacto directo al proyecto y a la unidad ejecutora, puede que el proyecto quede sin validez, poniendo en riesgo el trabajo realizado	No sobrepasar el contacto que se tiene con el hospital, preguntar previamente cuales son los medios de comunicación y las formas que se desean.	Antecedentes con otros proyectos anteriores	Comenzar nuevamente el proyecto con otra institución.
Errores técnicos	Riesgos asociados a cometer errores técnicos provenientes de la inexperiencia con softwares de simulación de las integrantes del grupo	Unidad ejecutora	50%	5	2,50	Nivel de calidad del proyecto total, no llegar a las aspiraciones deseadas tanto por parte del hospital como de los docentes	Capacitarse previamente en todas las herramientas que se van a utilizar, consultar tanto a los docentes como a expertos mejores prácticas y escuchar consejos	Antecedentes de proyectos anteriores	Comprar cursos para la unidad ejecutora de softwares simulación

6 MATRIZ RACI

MATRIZ RACI				
Unidad Ejecutora	Clara Lopez e Isabel Rodriguez			
Proyecto	Simulación y optimización en la sala de emergencias del Hospital de Clinicas			
			R Responsible	
			A Accountable	
			C Consulted	
			I Informed	
	ROLES O PERSONAS			
HITOS O TAREAS PRINCIPALES DEL PROYECTO	Tutores	Clara Lopez (Unidad Ejecutora)	Isabel Rodriguez (Unidad Ejecutora)	Contraparte (HC)
Primer contacto con el HC	A/R	I	I	C
Definición del proyecto y Doc. Aplicables	A	R	A/R	I
Estado del Arte	C	R	A/R	-
Recopilación de datos históricos	I	R	A/R	C
Diseño y generación del modelo de simulación	C	A/R	R	C
Validación y verificación del modelo de simulación	C	A/R	R	-
Ejecución de pruebas de experimentación	C	R	A/R	-
Análisis de los resultados de la simulación y conclusiones	C	R	A/R	I
Elaboración del informe de tesis	C	A/R	R	-
Presentación y defensa de la tesis	C	R	A/R	I

7 MODELADO

