



SIMULACIÓN DE INTERPRETACIONES RADIOLÓGICAS

Proyecto de Grado de la carrera Ingeniería en Computación
Versión 1.3

**INSTITUTO DE COMPUTACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
UDELAR**

Autor: A/C. Sebastian Scotti

Docente Supervisor: Dr. Ing. Hector Cancela

Facultad de Ingeniería Udelar - Abril 2017

Índice general

Índice general	1
1. Control de versión	4
2. Introducción	5
2.1. Área de Aplicación	6
2.2. Objetivo	6
2.3. Metodología	6
2.3.1. Fase - Definición del problema e identificación de la simulación	7
2.3.2. Fase - Implementación del modelo	9
2.3.3. Fase - Verificación y Validación del modelo	10
2.4. Estructura del trabajo	11
3. Estado del Arte	13
3.1. Alcance	13
3.2. SED en contexto clínico o healthcare en general	13
3.3. Centros de Excelencia	14
3.4. Radiología Diagnóstica	15
3.4.1. Sub-especialidades	16
3.4.2. Modalidades	16
3.4.3. Clasificación de procedimientos	17
4. Estudio y definición de herramientas	19
4.1. Herramientas comerciales SED en Healthcare	20
4.2. Herramientas para SED bajo licenciamiento libre	22
4.2.1. JaamSim	22
4.2.2. Ptolemy II	22
4.2.3. DESMO-J	23
4.2.4. Selección la herramienta para SED	23
4.3. Herramientas de apoyo utilizadas	24
4.3.1. IDE Eclipse MARS	24
4.3.2. R	24
4.3.3. Papyrus	25
4.3.4. TestNG	25
4.3.5. Texclipse	25
5. Modelado e implementación	26
5.1. Introducción	26
5.1.1. Lenguaje de Modelamiento	26
5.2. Especificación del modelo	27

5.2.1.	Modelo Conceptual	27
5.2.2.	Especificación del problema	28
5.2.3.	Diagrama de Estados	30
5.2.4.	Diagramas de Actividades	30
5.2.5.	Enfoque orientado por Eventos	34
5.3.	Recolección para los datos de entrada	38
5.3.1.	Estimación de las tasas de arribo	39
5.3.2.	Clasificación de procedimientos en sub-especialidades	41
5.3.3.	Estimaciones de las distribuciones para los tiempos de interpretación	41
5.3.4.	Aproximación en las proporciones de prioridad en los Procedimientos	42
5.4.	Implementación del modelo	43
5.4.1.	Codificación datos de entrada	44
5.4.2.	Visualización Gráfica	45
5.4.3.	Estadísticas	46
5.4.4.	Otras salidas del modelo	46
6.	Resultados Experimentales	47
6.1.	Verificación y Validación del Modelo	47
6.1.1.	Validación de trazas	47
6.1.2.	Test de Cubrimiento del Modelo Computacional	51
6.1.3.	Validación con Usuarios	51
6.2.	Experimentación	52
6.2.1.	Parámetros	52
6.2.2.	Escenario Actual	54
6.2.3.	Evaluación de Resultados - Escenario Actual	55
6.2.4.	Análisis de Resultados Escenario Actual y Definición de Escenario Alternativo	58
6.3.	Comparación de Situaciones	59
6.4.	Retroalimentación con Usuarios	63
7.	Conclusiones Finales	64
A.	Informe de Recomendaciones	66
A.1.	Antecedentes	66
A.2.	Introducción	66
A.3.	Simulación en Salud	67
A.4.	Especificación del modelo	67
A.4.1.	Objetivo	67
A.4.2.	Parámetros de entrada	68
A.5.	Opciones estudiadas	69
A.5.1.	Situación Actual	69
A.5.2.	Situación Alternativa	70
A.6.	Resultados	72
A.6.1.	Recomendaciones	73
B.	Revisión de Artículos	74
B.1.	Departamentos de Angiografía	74
B.1.1.	Un estudio de simulación en un Departamento de Angiografía	74
B.1.2.	La mejora en la programación mediante análisis y simulación de datos	75
B.2.	En Departamentos de Radiología	76
B.2.1.	Simulación para mejorar tiempos de espera en los pacientes	76
B.2.2.	Estudio en el flujo en el área de Tomografía	77

B.2.3. Atención de pacientes para Radiología General	77
C. Documentación del Código	79
C.1. Distribución de Paquetes	79
C.2. Archivos de Salida	80
C.3. Test de Cubrimientos de Código	81
Índice de figuras	83
Glossary	84
Bibliografía	86

En este capítulo se dispone el control de versión sobre la evolución del presente trabajo.

Versión	Mayores cambios	Fecha
0.1	Documento Inicial	Abril 2016
0.2	Inclusión de evaluación de herramientas	Abril 2016
0.3	Mejora en registro de referencias y criticas de artículos	Abril 2016
0.4	Especificación del modelo	Abril 2016
0.4.1	Se avanza en el modelo y se integro R con Java	Mayo 2016
0.4.2	Se comenzó con la recolección de datos	Junio 2016
0.5	Recolección de datos e implementación modelo	Diciembre 2016
0.6	Se incorporan aportes del capítulo de simulación en healthcare en 3.2	Diciembre 2016
0.7	Se incorporan aportes libro de simulación en java	Diciembre 2016
0.8	Evaluación de Resultados	Diciembre 2016
1.0	Correcciones generales	Diciembre 2016
1.1	Retroalimentación de los resultados con usuarios	Febrero 2017
1.2	Ajustes Preliminares	Marzo 2017
1.3	Ajustes Finales	Abril 2017

En este capítulo presentamos una introducción al proyecto de grado detallando: el problema a resolver, el objetivo del trabajo, la metodología a seguir y la estructura del resto de los capítulos.

Este proyecto se realizó basándose en un problema existente en el Departamento de Radiología dentro de una Clínica de Alta Complejidad (Centro Médico Imbanaco, Cali, Colombia).

Como resumen introductorio es necesario explicar que actualmente en los Departamentos de Radiología se realizan distintos tipos de procedimientos por medio de equipos médicos, los cuales generan imágenes que son interpretadas por los Radiólogos. Las distintas formas de organización para asignar la interpretación de los procedimientos entre los Radiólogos repercute en la calidad de la interpretación, así como también en el tiempo de respuesta a los pacientes y por ende, a los médicos tratantes.

La clínica afronta un gran desafío producto de la nueva edificación (Figura 2.1) donde el número de procedimientos se ha triplicado. Por lo anterior podemos concluir que el reto actual consiste en mejorar los tiempos de interpretación de los procedimientos sin desmejorar la calidad de la interpretación de los mismos, a pesar del aumento del flujo de pacientes.



Figura 2.1: Centro Médico Imbanaco - Nueva Edificación

Dentro de las acciones tomadas para afrontar este problema se incorporó la implementación de un Sistema de Información Radiológico (RIS).

El RIS es un sistema que permite gestionar y disponer una trazabilidad de las ordenes médicas (documento donde el médico tratante solicita el procedimiento), gestionar la creación de informes radiológicos y sistematizar todos los procesos que ocurren en el departamento para su funcionamiento. Con la aplicación del RIS se logra registrar una serie de indicadores que miden los tiempos operativos en los procesos del departamento, tiempos que serán utilizados en este proyecto como insumo. Para mas información recomendamos el artículo [KWM14] de la ACR, que muestra la importancia de un RIS en Clínicas de Alta Complejidad.

Específicamente se desarrollará un modelo de simulación por eventos discretos (SED) que contará con las siguientes características: representar las demandas de los procedimientos, evaluar las diferentes formas en que se asignan para su interpretación tomando en consideración las aptitudes clínicas de los Radiólogos (sub-especialidad) y mejorar los niveles de servicio que las instituciones en salud de alta complejidad requieren en sus procesos asistenciales. Cabe resaltar que actualmente las interpretaciones de los procedimientos se organizan basándose en el cubrimiento de turnos, sin profundizar en cada sub-especialidad radiológica.

2.1. Área de Aplicación

La herramienta funcionará para apoyar las decisiones y evaluar su impacto en las siguientes situaciones:

- Agregar o quitar un radiólogo.
- Agregar, mover o quitar turnos de radiólogo.
- Modo que se distribuyen los procedimientos entre los radiólogos.

2.2. Objetivo

El objetivo del proyecto es implementar un modelo de simulación por eventos discretos (SED) que permita el estudio cuantitativo de los tiempos de interpretación de los procedimientos y de cómo estos dependen de la organización del trabajo de los radiólogos, con vistas a una posible disminución de estos tiempos a través de la selección de las mejores políticas de organización entre los radiólogos.

La política basada en interpretación (diagnóstico) por Centros de Excelencia ha sido postulada como una solución para permitir una mejora sustancial en la asignación de los procedimientos a interpretar.

El concepto de Centro de Excelencia hará referencia a la división del trabajo según las diferentes sub-especialidades radiológicas, donde cada sub-especialidad estudia y se especializa en ciertos sistemas del cuerpo humano.

Dado que los integrantes de un Centro de Excelencia son los responsables clínicos de la interpretación de procedimientos que pertenezcan a la sub-especialidad, se realizará una clasificación detallada en los procedimientos y las competencias de los diferentes Radiólogos por sub-especialidad.

Para cumplir con este objetivo se dispondrá de datos históricos que permitan estimar las tasas de arribos de los diferentes procedimientos y la disponibilidad de Radiólogos. Con ello podemos analizar los tiempos medios que conlleva el proceso de interpretación, así como la eficiencia del sistema respecto al nivel de ocupación del staff (grupo) de Radiólogos.

2.3. Metodología

En esta sección se describe la metodología usada en el proyecto y para su desarrollo tomamos como referencia valiosos aportes del Capítulo I del libro [BP05].

Desde una amplia perspectiva, se entiende por método el camino a recorrer para alcanzar un objetivo. El método incluye diversas técnicas y procedimientos.

Si bien no hay un procedimiento específico para cada realidad podemos seguir el ciclo (proceso) de modelamiento que se ve en la Figura 2.2 (extraído de [BP05]), donde el Modelo Conceptual es el resultado de las abstracciones y deliberaciones en la mente del Modelador, mientras que el Modelo de la Computadora ejecuta las simulaciones luego de implementada la especificación del Modelo Conceptual.

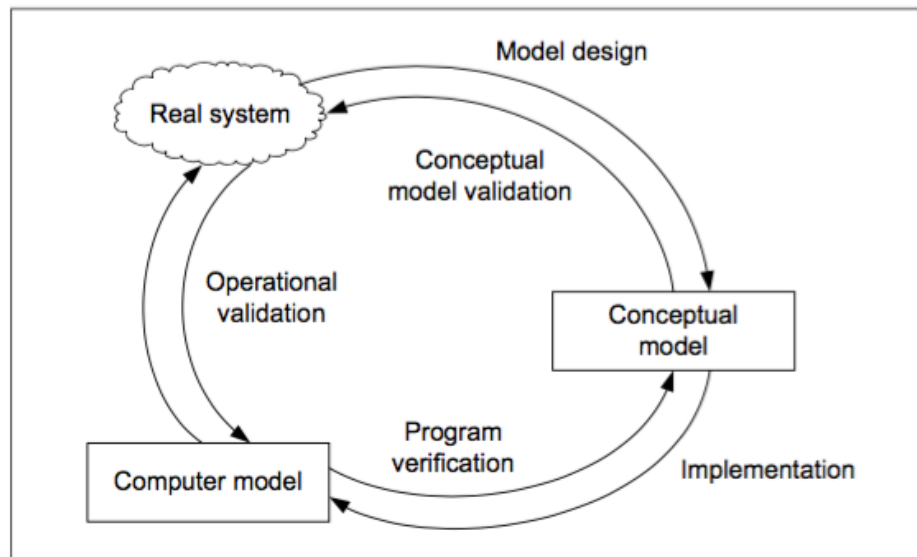


Figura 2.2: Proceso de la simulación

El ciclo de desarrollo se implementa mediante una metodología que consta de varias fases e hitos importantes que visualizamos en la Figura 2.3 y a continuación detallamos.

2.3.1. Fase - Definición del problema e identificación de la simulación

Definición del problema

La metodología inicia desarrollando claramente el problema, para poder definir un objetivo de mejora. Luego evaluar a que preguntas podemos dar respuesta mediante el ejercicio de la simulación, a modo de mostrar el potencial posible de esta técnica para mejorar o solucionar el problema.

Se debe evaluar claramente la factibilidad operativa, financiera y técnica sobre la resolución del problema. Además debemos tomar en cuenta el trabajo de colaboración entre los modeladores de la realidad y los usuarios, quienes aportarán su experiencia cotidiana.

Revisión del estado del arte

Luego debemos realizar una investigación minuciosa para establecer si hay trabajos realizados en el campo y el dominio del problema, por los cuales se potencie el trabajo a realizar mediante aportes concretos como pueden ser técnicas, resultados y estrategias usadas.

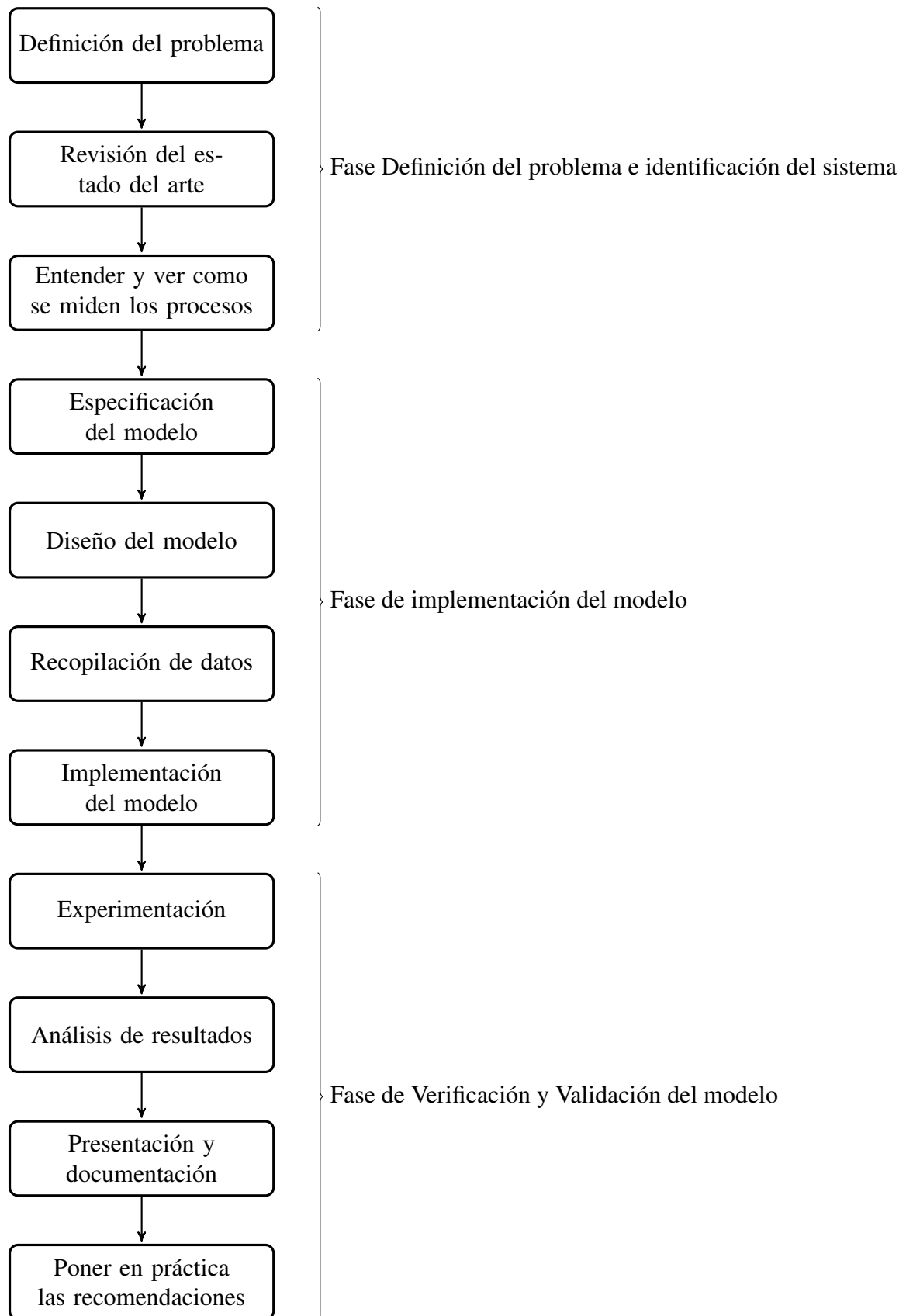


Figura 2.3: Metodología del trabajo

Entender y ver como se miden los procesos

Mediante un análisis en los procesos que intervienen en el problema, debemos tener claro que indicadores operativos permiten medirlos. De modo que al realizar ajustes en los procesos podremos estudiar su efectividad.

También es importante conocer el contexto de como intervienen entre sí las entidades que involucremos en nuestro modelo, así como una serie de suposiciones que permitan mantener todo el realismo posible.

2.3.2. Fase - Implementación del modelo

Especificación del modelo

En esta etapa es preciso la realización de un Modelo Conceptual que refleje la realidad que nos interesa conocer en nuestro proyecto.

Además, para la especificación del modelo, debemos definir los siguientes componentes:

- **Objetivo:** el objetivo de mejora.
- **Supuestos:** los cuales permitan entender como abstraer lo importante para nuestro modelo.
- **Entradas:** qué datos de entrada se necesitarán.
- **Parámetros:** qué parámetros de entrada debemos definir.
- **Variables de Decisión:** qué variables dejaremos libres a los expertos para poder simular y medir sus efectos.
- **Respuestas del sistema:** son las salidas medibles que reflejan indicadores que los expertos e interesados del problema pueden entender y evaluar.

Diseño del modelo

En esta etapa definimos qué enfoque abordaremos para la resolución de la simulación de eventos discretos, si será por fases (dos o tres) u orientada a procesos. Una vez seleccionado el enfoque se procede a modelar los siguientes objetos:

- **Entidades,** con sus respectivos atributos.
- **Recursos,** con sus respectivas capacidades.
- **Eventos,** con sus respectivos involucrados.

Recopilación de datos

En esta etapa definimos qué datos son necesarios para simular el sistema.

Debemos establecer de que manera se podrán obtener estos datos. Esto implica utilizar técnicas de integración de datos y técnicas de análisis en los mismos, para disponer en definitiva la entrada requerida para nuestro modelo.

En particular pueden realizarse estimaciones estadísticas, si son necesarias, para modelar propiedades de las entidades, eventos y actividades.

Implementación del modelo computacional

Mediante la codificación (implementación) del modelo conceptual logramos el modelo computacional.

En el modelo computacional cargamos los datos de entrada y obtenemos los resultados de la simulación, en archivos de trazas y archivos de salida.

Se recomienda el desarrollo de un ambiente visual del modelo computacional para poder facilitar una experimentación dinámica con los usuarios.

El modelo computacional se recomienda codificarlo en un lenguaje en el que pueda probarse su correctitud mediante pruebas de software.

2.3.3. Fase - Verificación y Validación del modelo

Experimentación

La simulación es una técnica experimental que requiere que los datos sean recolectados durante un experimento del modelo.

Los experimentos de simulación (“runs”) se realizan mediante la ejecución de un modelo computacional, variando semillas que originan secuencias de números pseudo aleatorios, que son utilizadas en las distribuciones estadísticas que componen el modelo. De modo que, con una misma semilla podemos replicar exactamente el comportamiento del modelo para validarlo y ajustarlo si es el caso.

Análisis de resultados

La extracción de conclusiones a partir de experimentos de modelos requiere la detección de patrones a partir de los cuales pueden extraerse conclusiones relevantes y útiles. Para detectar estos patrones podemos realizar análisis de sensibilidad sobre las variables de decisión y ver como se manifiestan las respuestas del modelo computacional.

Esta tarea requiere tanto la comprensión de la información estadística (por ejemplo medios, desviaciones, las

distribuciones de frecuencia), como la representación gráfica.

Dado que los experimentos de la simulación generan una gran cantidad de datos, es particularmente importante que sea lo más fácil posible detectar patrones interesantes.

Presentación y documentación

Presentar tanto el modelo como las conclusiones a los expertos del dominio en forma agradable y fácilmente comprensible, es un factor importante para la aceptación del modelo.

La representación gráfica es de particular valor en este contexto y debe utilizarse para documentar ambos modelos (por ejemplo, a través de diagramas UML) y los resultados de la simulación (mediante gráficos de barras, gráficos circulares y gráficos cronológicos).

Todo el material utilizado durante las fases del proyecto debe ser documentado.

Poner en práctica las recomendaciones

El paso final en el ciclo de modelado de simulación se refiere a la aplicación práctica de los resultados del modelo para resolver o mejorar el problema que el modelo estaba destinado a estudiar.

A veces, un modelo está destinado a ser utilizado como una herramienta para las decisiones recurrentes (por ejemplo, para el control de una central eléctrica). En este caso, la aceptación por el usuario y la facilidad de uso se hacen aún más importantes. La facilidad de comprensión, un alto grado de transparencia, interfaces altamente visuales, la adaptabilidad a los cambios del sistema y los requisitos del usuario, son criterios adicionales para el éxito en tales casos.

2.4. Estructura del trabajo

El desarrollo del resto del trabajo dispone de la siguiente estructura:

En el Capítulo 3 se encuentra una revisión del Estado del Arte.

Luego, en el Capítulo 4, comentamos las herramientas que se disponen para desarrollar el trabajo con las diferentes opciones de licenciamiento y otras consideraciones, además de una serie de características para poder comparar entre las mismas.

El Capítulo 5 especifica el modelo, su diseño e implementación, además de desarrollar los trabajos de recolección de datos.

A posteriori disponemos el Capítulo 6 con los resultados, incluyendo las etapas de validación y verificación, así como el análisis comparativo de escenarios mediante los resultados de simulación.

Finalmente el Capítulo 7 presenta las conclusiones generales y futuras líneas de trabajo.

En el Anexo A se presenta un bosquejo de la estructura y contenido de un informe de recomendaciones a los interesados en el trabajo (médicos a cargo de la Institución de Salud). En el Anexo B se presenta un análisis de artículos publicados en la literatura científica que versan sobre temas vinculados a los de este proyecto. En el Anexo C se presenta documentación del código del proyecto.

3.1. Alcance

Dentro del alcance que brindamos al presente trabajo se encuentra el revisar la utilidad del uso de la simulación de eventos discretos (SED) para el cuidado en salud (healthcare).

Actualmente encontramos una amplia bibliografía en el campo de la investigación operativa, por ejemplo a través de la “International Series in Operations Research & Management Science” [ser16], de los congresos del “Institute for Operations Research and the Management Sciences” (INFORMS) quienes en particular disponen grupos dedicados al cuidado de la salud [inf14] e incluso artículos de la IEEE entre otros.

Otra fuente importante para este capítulo es el libro “Advancing the Frontiers of Simulation” [CA09], libro que cuenta con un capítulo dedicado al cuidado de la salud, el cual brinda notables aportes a nuestro trabajo.

También se introducen conceptos y definiciones que dan contexto a la realidad del problema a estudiar y que serán usados a lo largo de este proyecto.

3.2. SED en contexto clínico o healthcare en general

La simulación por eventos discretos SED es una de las técnicas mas comúnmente usadas en investigación operativa, en particular es elegida frecuentemente para temas de cuidado en la salud ([DD86]).

Un modelo de SED identifica eventos que son puntos discretos en el tiempo cuando el estado del sistema puede cambiar. Los tiempos entre los eventos así como los nuevos valores de las variables de estado pueden ser, y normalmente son, estocásticos.

Este enfoque parece ser especialmente útil para los sistemas hospitalarios y otros procesos de atención en las que los pacientes se unen a las listas de espera para citas, exámenes y tratamientos.

En SED, las entidades tienen propiedades que determinan su flujo a través de un proceso de negocio, exactamente de la misma manera que los pacientes tienen características individuales que determinan su flujo a través de los procesos asistenciales.

Esta analogía contribuye en gran medida a la perdurable popularidad de SED como un enfoque de modelado. Desde el punto de vista psicológico, la SED es atractiva porque permite al modelador dar a las entidades

las características de los pacientes, como pueden ser edad, sexo, diagnóstico, grupo sanguíneo, estado de enfermedad, preferencia sexual, color de pelo, etc.

Además SED tiene muchas ventajas desde una perspectiva matemática. Los modelos de Markov tienen en cuenta el historial médico solamente a través del estado actual del sistema y representan tiempos entre cambios de estado con distribuciones exponenciales. Por el contrario, en un modelo SED, los eventos médicos futuros, las distribuciones del tiempo de servicio y otras acciones dentro de los eventos, pueden depender de toda la historia previa y las circunstancias ambientales, así como las características individuales del paciente.

Encontramos experiencias en modelos de simulación para la atención de pacientes en Departamentos de Emergencia, Cirugía, Radiología, Angiografía. . . . Realizamos una reseña de artículos relevantes para nuestro trabajo en el Anexo B.

Dentro de las experiencias comentamos, que por medio de una simulación en Centros de Imagen (Artículo [RBB⁺08]) encontramos una reducción del 35 % del tiempo de permanencia de los pacientes en las instalaciones, así como también se destaca el aumento de la productividad hasta un 54 % del mismo.

En otro caso para Centro de Imagen (Artículo [RND⁺04]) mediante la simulación, se evalúa cual sería el impacto de la implementación de un PACS (Sistema de Almacenamiento y Distribución de Imágenes Médicas), dando como resultado mejora en la tasa de atención de pacientes en un 20 % y disminución en el tiempo de generación de informes en más de un 30 %.

También encontramos aportes para los Departamentos de Angiografía (Artículo [GWK⁺08]). Estos aportes muestran como una mejor secuenciación de los procedimientos permitiría al departamento: ahorrar hasta 432 minutos una vez por semana, mejorar la asignación de personal disponible y aumentar la utilización de la sala de procedimientos en un 16 %.

Finalmente comentamos que los conceptos de retorno de inversión, optimización y evidencia médica son algunos de los conceptos que instituciones de nivel mundial manejan en todos sus procesos y decisiones operativas, clínicas y administrativas. Dichas instituciones son evaluadas por Gartner periódicamente en el ranking “The healthcare supply chain top 25” [Gar15].

En las secciones siguientes definimos el uso del término Centros de Excelencia sobre la Radiología Diagnóstica, para luego desarrollar la clasificación de los procedimientos.

3.3. Centros de Excelencia

El concepto de Centros de Excelencia es muy usado en el ámbito de la salud para referirse a diversas actividades especializadas, ejecución de mejores prácticas, o acreditaciones propiamente.

Colocando en contexto esta definición para nuestro abordaje, el concepto de Centro de Excelencia hace referencia a que la asignación de procedimientos para que sean interpretados se haga por las diferentes sub-especialidades radiológicas, donde cada sub-especialidad estudia y se especializa en ciertos sistemas del cuerpo humano.

El objetivo del trabajo es medir el impacto en el tiempo de interpretación de procedimientos, respecto a como se dividen (asignan) en las listas de interpretación de los Radiólogos.

Entiéndase como tiempo de interpretación de procedimientos al tiempo transcurrido desde que las imágenes son adquiridas en forma correcta por el equipo médico (Tomógrafo, Resonador, etc) hasta que el Radiólogo las interprete. También es necesario entender que las listas de interpretación corresponden al detallado de los procedimientos asignados para la interpretación del Radiólogo.

Normalmente los sistemas de RIS permiten definir listas de interpretación filtrando y ordenando por sub-especialidad (3.4.1), modalidad (3.4.2), prioridad, médicos remitentes, servicios de hospitalización, hora de realizado el procedimiento, etc.

En la Clínica donde se desarrolla el trabajo, la asignación de los procedimientos a los Radiólogos para que sean interpretados se hace de manera manual, instintiva por parte del personal técnico, ya que no se tienen parametrizadas en el sistema (RIS) las sub-especialidades, tampoco se conocen los largos de la lista de interpretación y el nivel de ocupación de cada Radiólogo en tiempo real.

Hasta donde hemos podido conocer, no existe hoy una herramienta disponible públicamente que permita un soporte de decisión para guiar cómo establecer una optimización del tiempo de interpretación de los procedimientos.

Esta breve explicación de la realidad en este departamento de radiología motiva nuestro proyecto, el cual busca disponer de un modelo que mediante simulaciones pueda sugerir una asignación mas efectiva en los procedimientos para su interpretación, cumpliendo los niveles de servicios que requiere cada proceso asistencial.

Se propone por parte de los Radiólogos de la Institución evaluar si una asignación de los procedimientos basada en la pertenencia a una sub-especialidad radiológica conduce a una mejora de la situación actual.

3.4. Radiología Diagnóstica

La radiología es una especialidad médica en la que una variedad de metodologías radiológicas se utilizan para diagnosticar y tratar enfermedades.

Un Radiólogo es un médico que es también un experto en imágenes con una formación especializada en la obtención e interpretación de imágenes médicas obtenidas mediante el uso de rayos X (CT, CR), que en algunos casos requieren el uso de sustancias radiactivas en medicina nuclear (NM) o por otros medios, como ondas de sonido (US) o magnetismo natural del cuerpo (MR).

El Radiólogo realiza una correlación entre pruebas de imagen médica con otros exámenes, recomienda además exámenes adicionales o tratamientos, e informa lo leído con los médicos de referencia (los médicos que envían los pacientes al departamento de radiología o clínica para la prueba). Los Radiólogos también tratan las enfermedades por medio de radiación (oncología de radiación o la medicina nuclear) o cirugía mínimamente invasiva guiada por imagen (radiología intervencionista)[def15a].

En definitiva se puede ver a un Radiólogo como “el ojo” de la medicina, ayudando al médico de atención primaria a diagnosticar y tratar enfermedades.

El tiempo de trabajo de los Radiólogos en las instituciones se divide en: actividades diagnósticas (interpretar imágenes) e intervencionismo (realizar procedimientos sobre los pacientes directamente). Además un Radiólogo, a través de un amplio trabajo clínico y de investigación relacionada, también puede especializarse en una o varias sub-especialidades de radiología.

Las sub-especialidades pueden ser tenidas en cuenta, como proponemos en nuestro trabajo, al momento de elaborar las listas de interpretación de imágenes que disponen los médicos radiólogos en la institución y las demandas de volumen de procedimientos que se deben realizar.

3.4.1. Sub-especialidades

Si bien existen más sub-especialidades, vamos a describir las mas estudiadas y, por ende, las más comunes en todas las instituciones, aumentando la replicabilidad del caso de estudio en otros centros médicos:

- **Imágenes de Mama (MA):** Sub-especialidad de la radiología dedicada al diagnóstico por imágenes y el diagnóstico de condiciones en enfermedades de la mama. Esto incluye Mamografía (MG), la Ecografía (US) de Mama , la Resonancia Magnética (MR) de Mama. También se cubren procedimientos como las Citologías e intervenciones de mama (Biopsia de Mama).
- **Radiología cardiovascular (CV):** Sub-especialidad de la radiología dedicada al diagnóstico por imágenes respecto a enfermedades del corazón y el sistema circulatorio vascular (incluyendo la sangre y los vasos linfáticos).
- **Tórax (TO):** Sub-especialidad de la radiología dedicada al diagnóstico por imágenes respecto a enfermedades del pecho, especialmente el corazón y los pulmones. Se cubren procedimientos de intervenciones en el pecho, por ejemplo biopsias pulmonares, toracocentesis o drenajes de líquido.
- **Abdómen (AB):** Sub-especialidad de la radiología dedicada al diagnóstico por imágenes de enfermedades del tracto gastrointestinal, tracto digestivo (estómago e intestinos), páncreas y tratamiento de los órganos del sistema urinario (próstata, hígado) y reproductor. Se cubren procedimientos de intervenciones gastrointestinales tales como biopsias, drenajes de líquidos y abscesos.
- **Radiología musculoesquelética (ME):** Sub-especialidad de la radiología dedicada al diagnóstico por imágenes respecto a enfermedades de los músculos y el esqueleto (huesos y tendones).
- **Neurorradiología (NR):** Sub-especialidad de la radiología dedicada al diagnóstico por imágenes de enfermedades en el cerebro, sistema nervioso, cabeza, cuello y columna vertebral.

En todas las sub-especialidades se realizan los procedimientos con diferentes modalidades: Rayos X (CR), Ecografía (US), Resonancia Magnética (MR) y Tomografía (CT).

3.4.2. Modalidades

A continuación comentamos brevemente el alcance de las modalidades más utilizadas de imágenes diagnósticas que apoyan el diagnóstico radiológico [def15b].

- **MG:** La Mamografía es un tipo específico de toma de imágenes de los senos que utiliza rayos X de baja dosis para detectar en forma temprana el cáncer (antes de que la mujer presente síntomas), cuando es más tratable.
- **CR,DX:** Los Rayos X utilizan una dosis muy pequeña de radiación ionizante para producir imágenes de las estructuras internas del cuerpo. Se utilizan generalmente para ayudar a diagnosticar huesos fractura-

dos, para buscar una lesión o infección o para localizar objetos foráneos en el tejido blando. Algunos de los exámenes por rayos X pueden utilizar un material de contraste a base de yodo o bario para ayudar a mejorar la visibilidad de determinados órganos, vasos sanguíneos, tejidos o huesos.

- CT: La Tomografía Computarizada es una prueba de diagnóstico por imágenes utilizada para crear imágenes detalladas de los órganos internos, los huesos, los tejidos blandos y los vasos sanguíneos.
- MR: Las imágenes por Resonancia Magnética utilizan un potente campo magnético, ondas de radio y una computadora para producir imágenes detalladas de las estructuras internas del cuerpo. Dichas imágenes son más claras, más detalladas y, en algunas instancias, pueden identificar y caracterizar enfermedades con mayor probabilidad que otros métodos de diagnóstico por imágenes. Se utiliza para evaluar en el cuerpo una variedad de condiciones que incluyen tumores y enfermedades del hígado, del corazón y del intestino.
- US: El diagnóstico por imágenes guiado por Ultrasonido (Ecografía) utiliza un transductor o sonda para generar ondas de sonido y producir imágenes de las estructuras internas del cuerpo.

3.4.3. Clasificación de procedimientos

El ACR (American College of Radiology) es la asociación que agrupa y representa a nivel mundial a los Radiólogos. En su página se pueden encontrar diversos recursos orientados a su comunidad, en particular para este proyecto cabe destacar el Catálogo de Procedimientos [Cat16].

El detalle de las actividades que conforman la realización de un procedimiento de imagen médica para ayudas diagnósticas debe ser la misma en todas las instituciones. Por ello en Colombia se definió un catálogo CUPS [Cat15] para estandarizar los procedimientos médicos a nivel país y será usado en este proyecto.

Sin embargo, la meta-data que rodea al concepto de procedimiento médico es tan importante ya que la evidencia médica recogida y plasmada en recomendaciones de guías clínicas por la ACR, permite que los sistemas de registros médicos al momento de ordenar procedimientos de imágenes diagnósticas puedan asistir al médico de las mejores prácticas para el paciente.

Estos sistemas de soporte de decisión (DSS) están disponibles para su uso a lo largo de EEUU [DSS16], se mantienen actualizados y son parte integral de los sistemas de historias clínicas para evitar que un médico ordene procedimientos que no sean efectivos, presentando al momento alternativas con sus recomendaciones. Consideramos que los DSS son el futuro para la ayuda en la toma de decisiones médicas, por ejemplo el sistema Watson de IBM [Wat16] permite realizar recomendaciones para tratamiento de cáncer con el objetivo de guiar a los oncólogos en sus decisiones clínicas, así como estandarizar protocolos de atención en salud.

En el Catálogo CUPS se encuentran bastantes temas administrativos mezclados con aspectos clínicos de un procedimiento. A modo de ejemplo, hay un código CUPS para un procedimiento de tomografía de abdomen sin contraste y otro código para el mismo procedimiento con el contraste. Esto genera una pérdida de semántica y limita la posibilidad de poder analizar la información de una forma más robusta a lo largo de un sistema nacional de cuidados.

La ACR define modificadores como atributos propios de un procedimiento [mod16] en su concepto, ya que dependiendo de estos atributos se deben tener aspectos clínicos en cuenta. Esto logra mayor seguridad al paciente, por ejemplo al aplicar un protocolo pediátrico (que da menos radiación para la formación de imágenes) a un niño basándonos en la información de su edad y no en un código de facturación. También para casos de

pacientes que son alérgicos al contraste se hace fundamental que se genere la alerta cuando se va a realizar u ordenar un procedimiento que requiere la aplicación del mismo.

Lo mencionado anteriormente nos lleva a la conclusión de que la codificación debe basarse en la diferenciación clínica entre los procedimientos y no en la diferenciación administrativa (costos e insumos).

A esto se suma otro problema, luego de configurados los mapeos entre los CUPS y los códigos de los procedimientos dentro de un RIS, los códigos administrativos pueden cambiar cada cierto tiempo y los procedimientos no cambian conceptualmente.

Cabe resaltar que este proyecto se enfoca en como disminuir el tiempo de interpretación de los procedimientos, por lo que realizaremos una agrupación entre diversos CUPS para un mismo procedimiento (abarcando sus modificadores clínicos), considerando que el tiempo en interpretar un procedimiento determinado en el catálogo CUPS edición 2015 será el mismo en la edición 2016 si la diferencia es administrativa, o por ejemplo si un procedimiento determinado se realiza a un niño será similar al tiempo de interpretar para un adulto. Lo que hará la diferencia significativa del tiempo de interpretación de los procedimientos será un aspecto clínico en si mismo.

Estudio y definición de herramientas

Para la selección de la herramienta que permita realizar nuestra simulación de eventos discretos (SED) utilizamos los siguientes criterios de búsqueda:

- Que sea una librería de desarrollo, ya que la herramienta espera sea independiente de plataforma e interfase gráfica (GUI), y no tenga que acoplarse a una herramienta comercial que limite su acceso libre a la comunidad.
- El lenguaje de la librería sea Java, por preferencia del autor y facilidades de integración para futuras líneas de trabajo, se dispone vasta experiencia en Java para desarrollo de aplicaciones empresariales, y buscamos potenciar dicha experiencia para el desarrollo de sistemas de soporte de decisión. Además quedar habilitados en la implementación de micro servicios bajo OSGI o implementar una RESTful API.
- Que la librería disponga de licenciamiento libre, para poder buscar sinergia del trabajo con otros trabajos en la comunidad académica, propios desarrolladores de la librería, para ser parte de la comunidad de desarrolladores, así como también potenciar o facilitar su reutilización dentro y fuera de la comunidad.
- Que el proyecto sea activo, disponga de acceso a la documentación y se pueda disponer de una comunidad para posibilitar consultas.

Luego de varias búsquedas por Google, lecturas de artículos científicos, encontramos en la wiki [wik16] una lista con detalles interesantes sobre las características que facilitaron la elección de la librería, para desarrollar la herramienta para implementación de SED bajo un licenciamiento libre.

4.1. Herramientas comerciales SED en Healthcare

En esta sección, presentamos un resumen de la evaluación realizada por INFORMS respecto a las herramientas de SED aplicadas a la salud [Inf15].

En la misma se detallan interesantes aspectos y criterios que debemos revisar, para tener claridad en el campo de funcionalidades que disponen el resto de soluciones de software que apoyan las SED.

La evaluación dispone una estructura que se divide en una serie de paginas cada una de ellas comenta un grupo de características según detallamos a continuación como las mas relevantes para el trabajo.

- 1 Empresa o nombre de la solución
- 2 Aplicación Típica,
- 3 Mercados Principales donde el software es aplicado, buscamos y colocamos énfasis a las que enmarcan “HealthCare”
- 4 Sistema Operativo
- 5 El sistema puede dar soporte a múltiples procesadores.
- 6 El programa se puede controlar por otro programa, cual ?
- 7 Modelado
 - a) Se permite construir el modelo mediante una GUI
 - b) Si el modelo se hace mediante programación de módulos
 - c) Si dispone debugger.
 - d) Se permite ajustes para distribuciones en la entrada, como ?.
 - e) Dispone análisis específicos en la salida, como ?.
 - f) Si da soporte para Optimizaciones específicas, cuales ?
- 8 Animación
 - a) Dispone Animaciones gráficas y Visualización en tiempo real .
 - b) Exportación en vídeo MPEG.
- 9 Disponibilidad de Soporte Entrenamiento, Comunidad, Cursos, Niveles de
- 10 Precios de licencia
- 11 Mayores funcionalidades o mejoras incorporadas luego de 2011, comentarios propios de la empresa

En las Tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 disponemos la evaluación de cumplimiento de los indicadores sobre 3 herramientas comerciales (MedModel utilizado en el Artículo [CAT⁺00], Flexsim utilizado en el Artículo [RBB⁺08] y Simul8).

1 - Solución	2 - Aplicación	3 - Mercados principales
MedModel [Med16]	Mejora y optimización de procesos utilización de recursos, rendimiento y capacidad del sistema	Atención sanitaria
Flexsim [Fle16]	Simulación y modelado de cualquier proceso con el propósito de analizar comprender y optimizar el proceso	Fabricación, envasado, almacenamiento manipulación de materiales, cadena de suministro, logística, atención sanitaria, industria de la minería y la industria aeroespacial.
Simul8 [Sim16]	Línea de Ensamblaje, planificación estratégica, BPMN, el ajuste de líneas, sistemas de salud, servicios compartidos, planificación de capacidad	Manufactura, Salud, Educación, Ingeniería cadena de suministro,logística, Negocios, BPMN, Lean, sector público, Call Centers

Tabla 4.1: Parte 1-Comparación de cumplimiento sobre indicadores seleccionados por solución

1 - Solución	4 - SO	5	6 - Controlado por	7a	7b	7c
MedModel [Med16]	Windows Vista/7/8	Si	Excel, Access, C#,VB ,VBA	Si		Si
Flexsim [Fle16]	Windows Vista/7/8 y 10		OLE	Si	Si	Si
Simul8 [Sim16]	Windows	Si	Excel, Cualquier IDE a traves de COM	Si	Si	Si

Tabla 4.2: Parte 2- Comparación indicadores seleccionados

1	7d - Ajuste Entrada	7e - Analisis Salida	7f - Optimizacion
MedModel	16 distribuciones estadísticas disponibles	A través del visor de salida y un Minitab	SimRunner [Sim15]
Flexsim	Totalmente integrado con ExpertFit [Exp16]	Un conjunto completo de tablas y gráficos en el tablero de instrumentos	OptQuest [Opt11]
Simul8	Las opciones personalizadas dentro del software y Stat::Fit [Sta15]		OptQuest

Tabla 4.3: Parte 3- Comparación indicadores seleccionados

1 - Solución	8a	8b	9	10 - Precio Aprox.
Medmodel	Si		Si	USD 21.500
FlexSim	Si	Si	Si	USD 10.000-20.000
Simul8	Si		Si	USD 7.500

Tabla 4.4: Parte 4- Comparación indicadores seleccionados

Para el indicador 11, sobre las mejoras relevantes desde 2011

- Medmodel:Multi-View Runner, Intellisense, Windows Logic, Guía de Sintaxis, ampliado en ventana depuración.
- FlexSim: Las características mejoradas de manipulación de materiales (módulos de AGV y transportadoras), la mejora de tablas y gráficos.Documentación mejorada, gráficos mejorados (incluyendo sombras y shaders), interfaz mejorada, versión de 64 bits.
- Simul8: Planificador del día, la Lista de Recursos, Viajes en el tiempo Matrix, la individualidad de recursos, mantenimiento programado, MAS Terreno, variable Collect

4.2. Herramientas para SED bajo licenciamiento libre

Respecto a licenciamiento libre y la wiki citada anteriormente [wik16], resumimos en la tabla 4.5 seleccionamos los criterios establecidos al comienzo del capítulo para nuestro trabajo.

Nombre	Lenguaje	Licencia	Fecha actualización	Versión	Tipo
JaamSim [Jaa16]	Java	Apache 2.0	October 4, 2016	2016-24	Aplicación
Ptolemy II [Pto14]	Java	BSD	December 17, 2014	10.0.1	Librería
DESMO-J [DES15]	Java	Apache 2.0	November 30, 2015	2.5.1c	Librería

Tabla 4.5: Comparación criterios para nuestro trabajo

A continuación describimos JaamSim y Ptolemy II brevemente además manifestamos porque no se adecuan a nuestro trabajo en particular.

4.2.1. JaamSim

Breve referencia

JaamSim (Java Animation Modeling and Simulation) [Jaa16] es un paquete de software de simulación de eventos discretos desarrollado por primera vez en 2002 como base para aplicaciones de simulación.

Incluye una interfaz gráfica de arrastrar y soltar, animación 3D y un conjunto completo de objetos incorporados para la construcción de modelos.

Inconvenientes de adecuación al uso

Al ser una aplicación acoplada en todas sus capas imposibilita quitar la interfaz gráfica (GUI), para poder realizar 30 o 50 experimentos variando las semillas y generar archivos de salida precisos para post-procesarlos en cada experimento.

Tampoco vemos que pueda soportar claramente un desarrollo de SED basado en fases.

4.2.2. Ptolemy II

Breve referencia

El proyecto de Ptolemy [Pto14] estudia el modelado, la simulación y el diseño de sistemas concurrentes, en tiempo real, embebidos. El enfoque se centra en el ensamblaje de componentes concurrentes.

El principal principio subyacente en el proyecto es el uso de modelos bien definidos de cálculo que gobiernan la interacción entre los componentes.

Un problema importante que se está abordando es el uso de mezclas heterogéneas de modelos de computación.

Inconvenientes de adecuación al uso

No dispone de interfaz gráfica (GUI) para poder hacer una validación del modelo con los usuarios.

4.2.3. DESMO-J

Breve referencia

DESMO-J es un framework orientado a objetos dirigido a programadores que desarrollan modelos de simulación. El acrónimo “DESMO-J” significa “Simulación de eventos discretos y modelado en Java”. Este nombre más largo destaca las dos propiedades significativas de DESMO-J:

- DESMO-J soporta el paradigma de simulación de eventos discretos. En modelos de este tipo, se supone que todos los cambios de estado del sistema ocurren en puntos discretos en el tiempo. Entre estos eventos se supone que el estado del sistema permanece constante. Por lo tanto, la simulación de eventos discretos es particularmente adecuada para sistemas en los que los cambios de estado relevantes ocurren repentinamente e irregularmente.
- DESMO-J se implementa en Java. El uso de esta librería para construir modelos de simulación finalmente da como resultado la escritura de un modelos computacionales escritos en código Java.

Inconvenientes de adecuación al uso

El tiempo de desarrollo del modelo computacional puede ser mayor por ser una librería, ya que no dispone un entorno gráfico (IDE) que facilite el desarrollo del modelo.

En particular este inconveniente para nuestro trabajo no es importante por ser un modelo pequeño que dispone de pocas entidades y eventos.

4.2.4. Selección la herramienta para SED

La selección fue a favor de la librería DESMO-J [DES15]. La herramienta cubre nuestros criterios de búsqueda en un 100 % por que:

- Es una Librería y brinda la posibilidad de desarrollar una interfaz gráfica (GUI) para visualizar dinámicamente los modelos (ayudando a validarlo con los usuarios). También permite correr y adaptar el modelo fácilmente para realizar la experimentación y análisis de resultados con el mismo.
- Esta basada en Java 8 previendo manejar simulaciones muy robustas con soporte en hilos paralelos.
- Dispone de licenciamiento libre.
- El proyecto sigue activo hasta la fecha.

Además DESMO-J soporta la separación de modelo y experimento, un requisito ampliamente reconocido de un buen software de simulación, ya que permite realizar el mismo experimento con diferentes modelos que puedan representar distintos diseños de sistemas o estrategias alternativas.

En DESMO-J la clase del modelo maneja todos los componentes del modelo, mientras que la clase experimento proporciona la infraestructura de simulación. Ambos están conectados de forma explícita durante una corrida de simulación.

Dentro de las funcionalidades no se dispone la validación de modelos o analizar los resultados estadísticos del experimento, sin embargo se puede incorporar en lenguaje R (comentado en la sección 4.3.2) para dichas funciones.

Se dispone de un tutorial de la herramienta, la cual aconseja que los usuarios sepan los conceptos de programación orientada a objetos así como también, los conceptos de simulación de eventos discretos.

Finalmente disponemos un excelente libro de referencia [BP05], al cual ajusta la metodología usada en el trabajo, notaciones gráficas, códigos de ejemplo que nos resultan útil para bajar la curva de aprendizaje en la librería.

4.3. Herramientas de apoyo utilizadas

En esta sección se presentan otras herramientas de apoyo que fueron seleccionadas para ser utilizadas en el proyecto.

4.3.1. IDE Eclipse MARS

Con el fin de poder desarrollar el trabajo en un solo ambiente (IDE) que integre las librerías y la generación de documentación con licenciamiento libre, se escogió Eclipse MARS [ecl15].

Además con ello disponemos todas las posibilidades de integración con “plugins” de apoyo (secciones 4.3.3 y 4.3.5), como ser control de versionamiento de código y automatización de Test (4.3.4).

4.3.2. R

Para facilitar el análisis estadístico para procesar datos de entrada y evaluar resultados del proyecto, seleccionamos R [r16] por experiencia previa y posibilidades de integración con el IDE.

En particular comentamos que se disponen 2 mecanismos para integrar R a un IDE eclipse, Rejin y rJava, si bien Renjin parece más amigable soporta un lenguaje R embebido que puede no ser el más actualizado, por lo que seleccionamos rJava que integra la versión que se configure, siendo más flexible en configurar una línea base para el trabajo.

4.3.3. Papyrus

Para la diagramación del diseño del modelo escogimos Papyrus [pap16], el cual tiene un soporte formidable en la especificación UML2 y también dispone de licenciamiento libre.

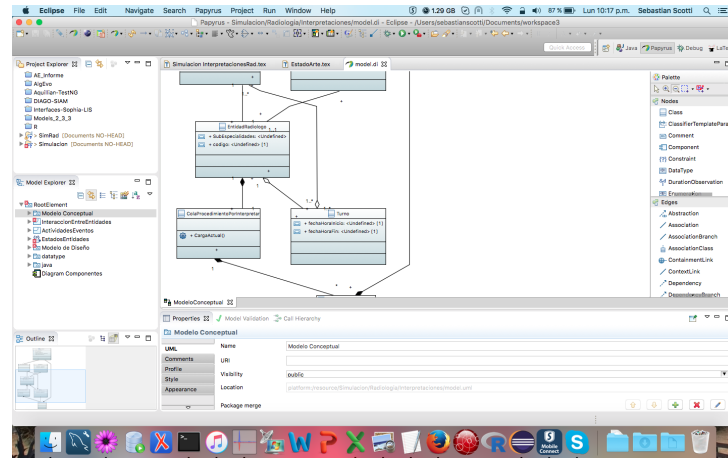


Figura 4.1: Entorno para diagramar en UML

4.3.4. TestNG

Para realizar las tareas automatizadas de verificación de software seleccionamos a TestNG [tes16], previendo las tareas de automatismo que necesitaremos en la experimentación con el modelo computacional.

4.3.5. Texclipse

Por experiencia previa seleccionamos Latex para elaborar el conjunto de documentación necesaria para el trabajo.

Incluimos Texclipse [tex16] a modo de integrar en el IDE posibilidad de editar el código Latex, logrando posibilidades de control de versión y correcciones ortográficas (Figura 4.2).

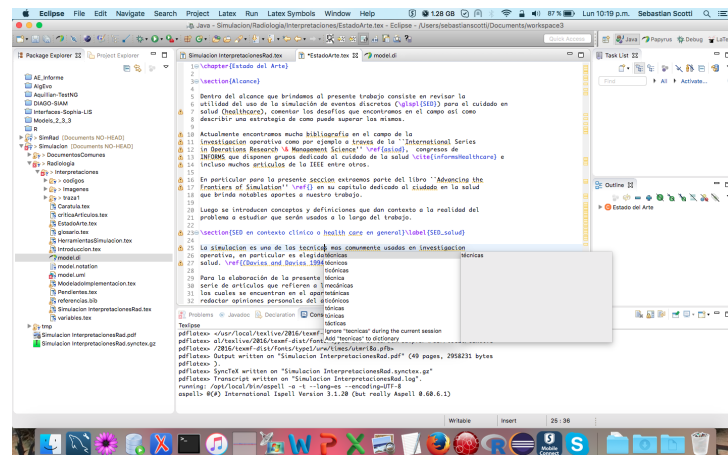


Figura 4.2: Entorno para documentar en Latex

5.1. Introducción

En este capítulo se muestra como desarrollamos el modelado del problema y como lo implementamos mediante el uso de la simulación de eventos discretos SED, apoyándonos también en el lenguaje de modelamiento UML2.

La estructura del capítulo comienza con un modelo conceptual, la especificación del modelo a simular, detallando el enfoque de la resolución por eventos, aspectos estáticos y dinámicos.

A modo de generar una entrada al modelo describimos los componentes del mismo, cómo fueron obtenidos desde la realidad y estimaciones estadísticas.

Luego desarrollamos la implementación del modelo, donde mostramos la codificación de los datos de entrada que fueron realizadas mediante archivos, como fue desarrollada la visualización gráfica que permite validar el modelo con los usuarios, además de describir los archivos de salida que se producen.

5.1.1. Lenguaje de Modelamiento

Los lenguajes de modelamiento mas usados en la industria de software son BPMN (Business Process Model and Notation) y UML2 (Unified Modeling Language).

BPMN es ampliamente usado para describir, analizar procesos y documentar los mismos de una forma amigable con los usuarios.

UML2 es un lenguaje de modelamiento unificado que esta apoyado por procesos de desarrollo de software a lo largo de todas las etapas del mismo, es decir no solo en análisis sino también diseño e implementación. En particular, lo vemos aplicable en todas las fases de la metodología utilizada en nuestro trabajo (Sección 2.3). Adicionalmente, como se mencionó en la sección 4.2.3, la librería DESMOJ está basada en objetos y soporta varios enfoques de resolución. Por lo que, buscando una reutilización de la experiencia al momento de diagramar, validar y describir los comportamientos de los modelos para implementar mediante una simulación con esta librería, optamos por UML2.

También cabe resaltar que escoger UML2 permite modelar la simulación por medio de dos enfoques, fases de eventos y procesos, característica que no tiene el lenguaje BPMN.

5.2. Especificación del modelo

Para esta sección del trabajo realizamos una serie de reuniones con usuarios del departamento de radiología que actualmente manejamos como caso de estudio.

Luego de diagramar un modelo conceptual y especificar el problema, se realizaron descripciones gráficas de aspectos dinámicos mediante diagramas de estados de las principales entidades y de cada evento, así como diagramas de actividades sobre la dinámica que existe entre las entidades, para finalmente validarlo con los usuarios y proceder a realizar una implementación del mismo.

5.2.1. Modelo Conceptual

En el modelo conceptual de la Figura 5.1 reflejamos el modelo de dominio que estamos tomando en cuenta respecto a la realidad que deseamos modelar y describimos las entidades, eventos, actividades y colas de espera.

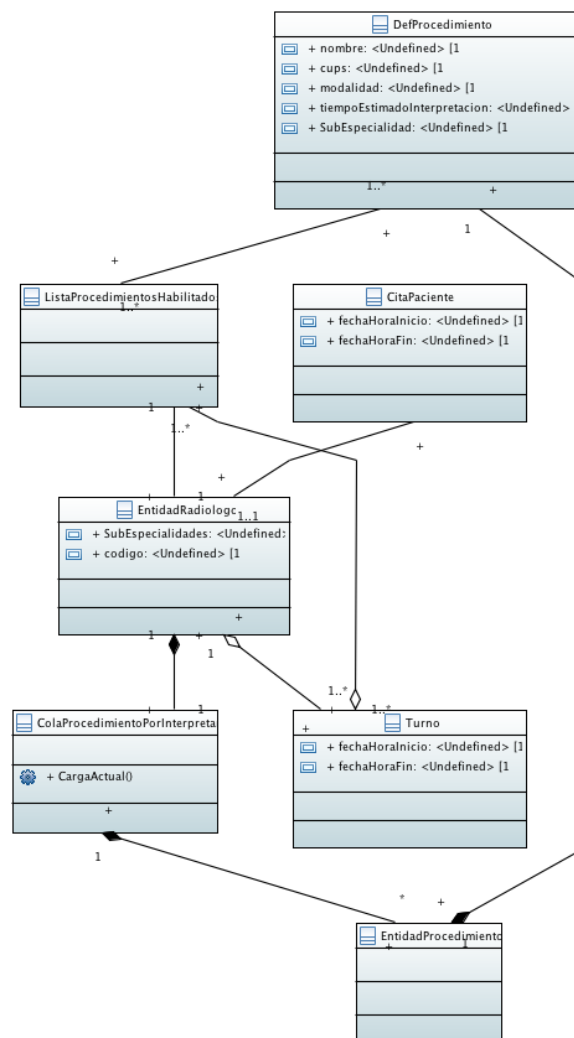


Figura 5.1: Modelo Conceptual

5.2.2. Especificación del problema

En la especificación del problema describimos el objeto de estudio, las abstracciones de la realidad que realizamos, las respuestas que esperamos del modelo para que ayuden a solucionar el problema y las variables de decisión que puede manejar quienes gestionan el sistema (en este caso, el Coordinador de Radiología o quien tenga esa tarea en la institución).

Objetivo

El objetivo es el estudio cuantitativo de los tiempos de interpretación de los procedimientos y de cómo estos dependen de la organización del trabajo de los radiólogos, con vistas a una posible disminución de estos tiempos a través de la selección de las mejores políticas de organización entre los Radiólogos.

Entiéndase como tiempo de interpretación de procedimientos al tiempo transcurrido desde que las imágenes son adquiridas en forma correcta por el equipo médico (Tomógrafo, Resonador, etc) hasta que el Radiólogo las interprete.

Suposiciones

- El radiólogo se encuentra interpretando imágenes médicas con la posibilidad de que le programen citas para realizar procedimientos particulares con pacientes (ecografías, fluoroscopias), por lo que se verá interrumpido el proceso de interpretación de las imágenes mientras dure la cita.
- Siempre hay estaciones de interpretación disponibles.
- Solo se simulan procedimientos que se interpretan exclusivamente mediante imágenes, sin que el paciente este presente.
- Suponemos conocido el equipamiento médico y staff de tecnólogos para todos los escenarios.
- La simulación se realiza con el conjunto de los procedimientos mas representativos en cada modalidad (MR, CR y CT).
- Los niveles de servicio se establecen como los tiempos máximos en que debe ser interpretado un procedimiento, dependiendo su tipo (normal, prioritario, urgencias).
- Las distribuciones de interarribo de procedimientos son estimadas mediante datos históricos.

Se descartan las siguientes situaciones:

- No se modelará que un Radiólogo ceda un procedimiento para que otro especialista lo interprete.
- No se modelará la interpretación de procedimientos fuera del horario hábil ya que la institución dispone de Radiólogos exclusivos para dicha tarea.
- No se modelará que los pacientes o médicos solicitantes indiquen quién debe interpretar el procedimiento.

- Un Radiólogo sólo interpreta lo que dispone en su lista de interpretación (cola de procedimientos esperando interpretación).
- No se modelará la posibilidad de manipular las colas, intercambiando procedimientos para mejorar el cumplimiento de los niveles de servicio (esto implicaría definir un monitor de cumplimiento de calidad de servicios, que excede el alcance de este trabajo).

Parámetros de entrada

- Staff de Radiólogos indicando las sub-especialidades de los mismos
- Tasas de arribo de los Procedimientos durante el día, para poder simular tasas de arribo variables según la hora. Se ajustaran a distribuciones exponenciales con soporte para diferentes tasas (lambdas) para cada modalidad (aplicando thintime).
- Distribuciones de probabilidades que representen los tiempos de interpretación de los procedimientos en cada modalidad/sub-especialidad (ajuste a distribución normal o log-normal, parámetros de la distribución).
- Política de la asignación para interpretación.
- Política de selección de procedimientos a interpretar.
- Proporción de prioridades y sub-especialidades de los procedimientos.
- Niveles de servicio.
- Periodo de la simulación.
- Horario hábil.

Variables de decisión

Definición de turnos, incluyendo en cada uno:

- Día y hora de comienzo.
- Día y hora de fin.
- Radiólogo.
- Modalidades y sub-especialidades cubiertas.

Respuestas

Se obtendrán las siguientes respuestas:

- Tiempo medio de permanencia del procedimiento en la lista de interpretación del Radiólogo.
- Tasa de ocupación de cada Radiólogo.
- % Cumplimiento por niveles de servicio.

5.2.3. Diagrama de Estados

El Radiólogo tiene tres estados bien definidos cuando se encuentra de turno (Figura 5.2):

1. Libre: Es cuando queda libre y se encuentra de turno en la institución.
2. Realizando Procedimientos: Son los casos donde el Radiólogo atiende a un paciente por cita programada (Biopsias, Ecografía (US), Fluroscopia (RF)).
3. Interpretando: El Radiólogo se encuentra interpretando los procedimientos.

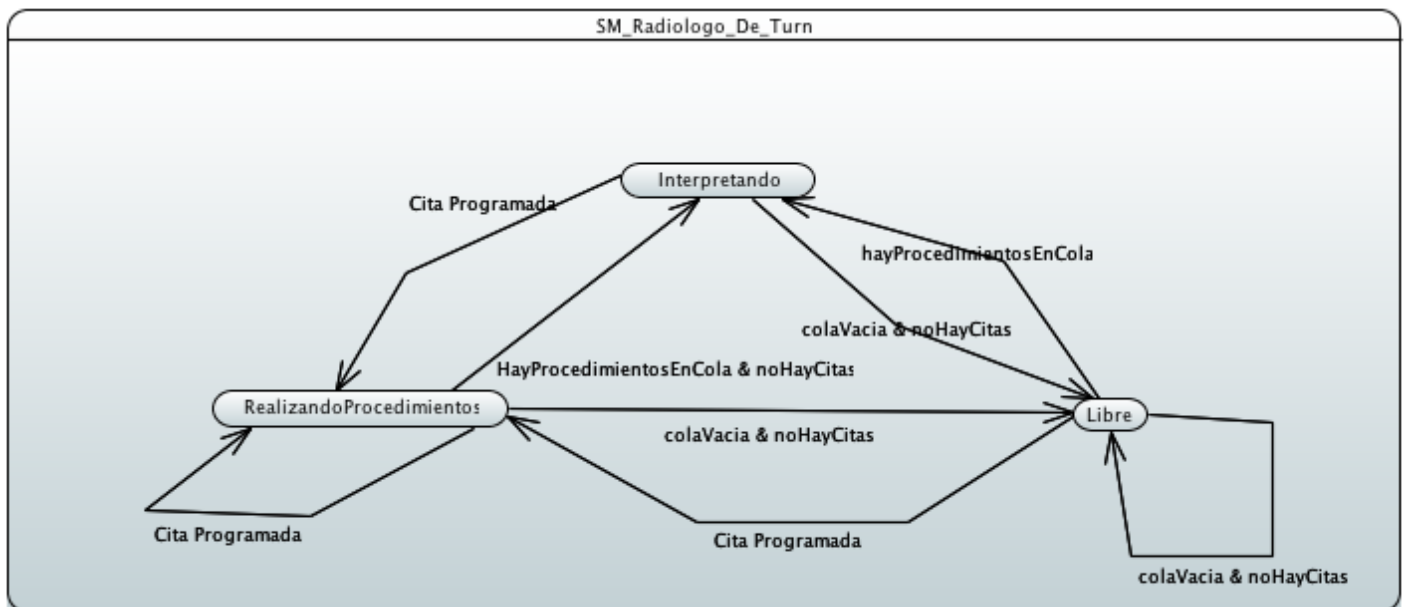


Figura 5.2: Diagrama de estados de la entidad Radiólogo

5.2.4. Diagramas de Actividades

El flujo principal de la simulación se encuentra ilustrado en la Figura 5.3, donde se aprecia que el Equipo mientras se encuentra activo va realizando procedimientos a los pacientes. Luego el tecnólogo asigna mediante una política de selección a un Radiólogo de turno para que éste lo interprete.

El Radiólogo seleccionará el procedimiento a interpretar bajo otra política dependiendo de las prioridades y subespecialidades que tenga asignadas para cubrir en su turno.

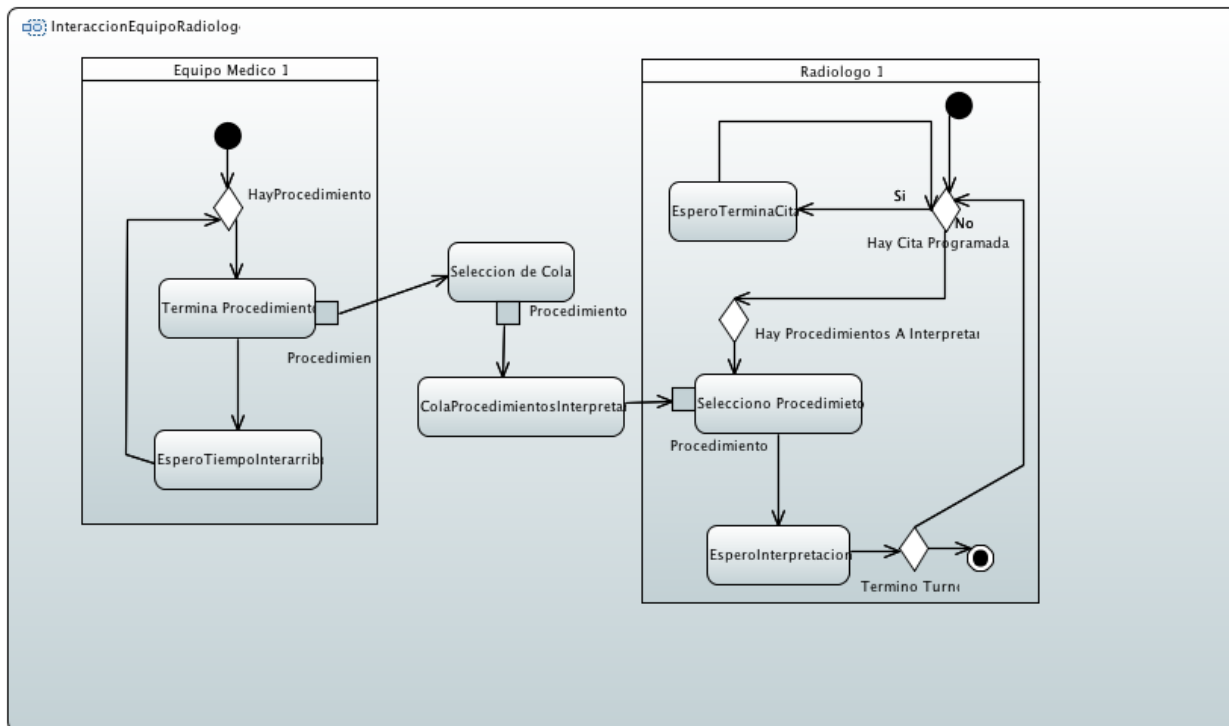


Figura 5.3: Diagrama del flujo principal de la simulación

Política de Selección de Cola

En el Pseudocódigo 5.1 se muestra el algoritmo que implementa la política de selección de cola para asignar a cada nuevo procedimiento generado por los equipos.

Pseudocódigo 5.1: Política de Selección de Cola

```
public class SeleccionPorAptitud implements SeleccionColaProcedimientos {

    public QueueAnimation<Procedimiento> interpretarProcedimiento(Procedimiento p)
    {
        int colaSel=-1;

        //Quien Sabe interpretar el procedimiento(id) y esta de turno
        List<Radiologo> candidatos=getRadiologosEnTurnoAsignadoParaInterpetar(p);

        int idRadCandidato;
        //Lista de candidatos
        if (candidatos.size()>0){
            //para terminar dando al de menos carga acumulada y que tenga menos
            //utilizacion de la simulacion
            idRadCandidato=buscarCandidato(candidatos);
            //Asocio la cola
            colaSel=candidatos.get(idRadCandidato).getId();
        }

        if (colaSel===-1){
            // no hay nadie de turno asignado para interpretarlo
            candidatos=getRadiologosEnTurnoQuePuendenInterpetar(p);
            //debo chequear si es urgente o prioritario
            if (p.getQueueingPriority()!=Prioridad.NORMAL.getValor() && candidatos.
                size()>0){
                //debo elegir a alguien que sepa como subespecialidad
            }
        }
    }
}
```

```

        interpretar() y este de turno actualmente
        idRadCandidato=buscarCandidato(candidatos);
        colaSel=candidatos.get(idRadCandidato).getId();
    }else{
        // (es normal) o (es urgente y no hay nadie de turno que lo
        // pueda leer)
        // busco por proximo radiologo de turno con menos utilizacion
        // que sepa interpretar el estudio
        idRadCandidato=0;
        double tiempo=modelo.radiologos[idRadCandidato].
            calcularCuandoPuedeInterpretar(p);
        for (int i=1;i<modelo.radiologos.length;i++){
            double aux=modelo.radiologos[i].
                calcularCuandoPuedeInterpretar(p);
            if (aux < tiempo){
                tiempo=aux;
                idRadCandidato=i;
            }
        }
        if (tiempo==modelo.getExperiment().getStopTime().
            getTimeAsDouble()){
            //no encuentre quien interprete el procedimiento lo que
            //resta de la simulacion
            colaSel=-1;
        }else{
            //Asocio la cola
            colaSel=modelo.radiologos[idRadCandidato].getId();
        }
    }
}

QueueAnimation<Procedimiento> q;
if (colaSel===-1){
    q=modelo.procedimientosSinRadiologoQuePuedaInterpretar;
}else{
    q=modelo.colasProcedimientos[colaSel];
}

return q;
}

private int buscarCandidato(List<Radiologo> candidatos) throws Exception{
    //ordeno por utilizacion
    ordenarUtilizacionRadiologos(candidatos);

    //Para cada candidato reviso la carga acumulada CA del candidato de menor
    //utilizacion
    int idRadCandidato=0;

    double cargaCandidato=candidatos.get(idRadCandidato).calcularCargaAcumulada(
        modelo.presentTime());
    for (int i=1;i<candidatos.size();i++){
        //Obtengo el radiologo que tenga menor carga acumulada
        double aux=candidatos.get(i).calcularCargaAcumulada(modelo.
            presentTime());
        if (aux < cargaCandidato){
            cargaCandidato=aux;
            idRadCandidato=i;
        }
    }
}

```

```

        return idRadCandidato;
    }
}

```

Política de Selección de Procedimiento a Interpretar

La selección que realiza el Radiólogo de un procedimiento a interpretar se realiza mediante un algoritmo de selección que implementa una política que se detalla en el Pseudocódigo 5.2.

Pseudocódigo 5.2: Política de Selección de Procedimiento a Interpretar

```

public class InterpretacionPorTurno implements SeleccionProcedimientoParaInterpretar {

    AsignacionInterpretacionGUI modelo;

    public InterpretacionPorTurno (AsignacionInterpretacionGUI modelo) {
        this.modelo=modelo;
    }

    @Override
    public Procedimiento siguienteProcedimiento(Radiologo radiologo) {
        Procedimiento resultado=null;
        int i=0;
        Queue<Procedimiento> cola=modelo.colasProcedimientos[radiologo.getId()]
        ];
        while ((resultado==null) && i<cola.size()){
            //resultado=modelo.colasProcedimientos[radiologo.getId()].first
            ();
            Procedimiento candidato=modelo.colasProcedimientos[radiologo.
            getId()].get(i);
            //chequeo primero prioridad
            if ((candidato.getQueueingPriority()==Prioridad.URGENTE.
            getValor())
                ||
                candidato.getQueueingPriority()==Prioridad.PRIORITARIO.
                getValor()){
                resultado=candidato;
            }else if (radiologo.getTurnoActual().cubre(candidato)){
                //luego solo leo los normales que cubro en el turno
                actual
                resultado=candidato;
            }else{
                i++;
            }
        }

        return resultado;
    }
}

```

5.2.5. Enfoque orientado por Eventos

Dentro de los enfoques que podemos abordar para especificar el modelo de simulación para resolverlo, disponemos de las tres siguientes opciones: orientado por eventos dos fases, tres fases o procesos. La librería seleccionada soporta dos fases y/o procesos.

Nuestro trabajo se enfoca en realizar el modelo en dos fases orientado por eventos, debido a la experiencia previa del autor tras haber realizado un Curso de Simulación que se dicta en el Instituto de Computación.

Los principales eventos se especifican a continuación:

Evento - Terminar Cita

El evento se observa en la Figura 5.4.

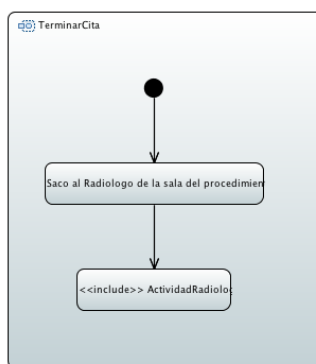


Figura 5.4: Diagrama de actividades Evento - Terminar Cita

El evento se produce al momento que se termina una cita programada entre un paciente y un Radiólogo, posibilitando una transición de estados de la entidad Radiólogo según se describe en la Figura 5.7.

Evento - Terminar Interpretación

El evento se observa en la Figura 5.5.

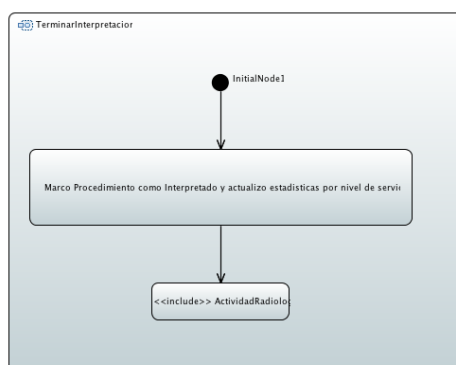


Figura 5.5: Diagrama de actividades Evento - Terminar Interpretación

El evento se produce al momento que se termina la interpretación de un procedimiento por parte de un Radiólogo, se ajusta el estado del procedimiento y se actualizan las estadísticas de cumplimiento de servicio según la prioridad asignada al procedimiento, para que luego el Radiólogo siga sus actividades como se indica más adelante en la Figura 5.7.

Evento - Terminar Turno

El evento se observa en la Figura 5.6.

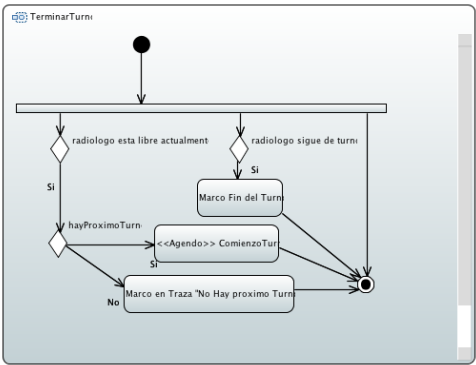


Figura 5.6: Diagrama de actividades Evento - Terminar Turno

Al momento que se terminar el turno puede que el Radiólogo siga realizando otras actividades, por lo que se marca el fin del turno en la entidad Radiólogo, y se agenda el próximo turno si existe (Figura 5.6).

Actividad del Radiólogo

El Radiólogo cuando se encuentra de turno sigue una secuencia de actividades que marcan el proceso de su jornada laboral (Figura 5.7).

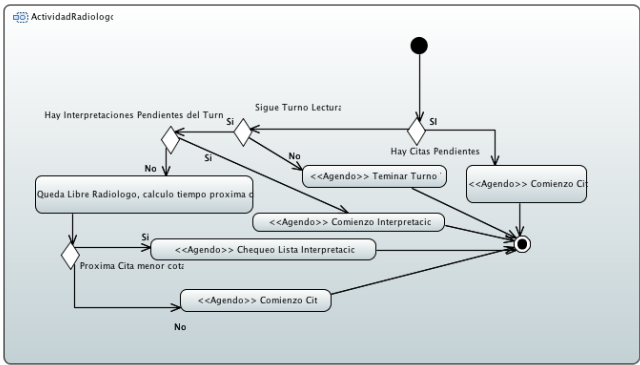


Figura 5.7: Diagrama de actividades del Radiólogo

Evento - Comienza Cita

El evento se observa en la Figura 5.8.

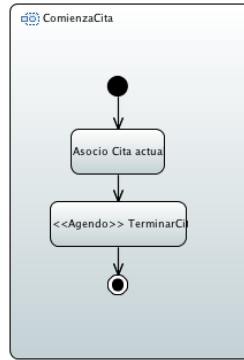


Figura 5.8: Diagrama de actividades Evento - Comienza Cita

El evento ocurre al momento que la cita programada previamente con el Radiólogo comienza, se asocia la cita que comienza para luego agendar el evento para Terminar la Cita.

Evento - Comienza Interpretación

El evento se observa en la Figura 5.9.

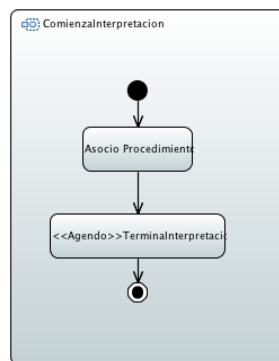


Figura 5.9: Diagrama de actividades Evento - Comienza Interpretación

El evento ocurre al momento que comienza la interpretación de un procedimiento (luego de que fue seleccionado por el Radiólogo según la política establecida), se asocia el procedimiento al Radiólogo y luego se agenda otro evento para Terminar la Interpretación.

Evento - Comienza Turno

El evento se observa en la Figura 5.10.

Después de iniciado el turno agendamos un evento para terminarlo y siguen las actividades del Radiólogo (Figura 5.7).

Evento - Generador Procedimientos

El evento se observa en la Figura 5.11.

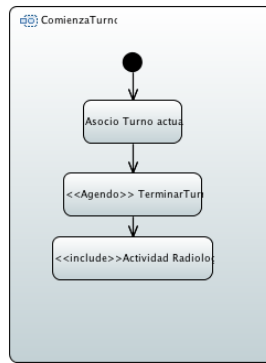


Figura 5.10: Diagrama de actividades Evento - Comienza Turno

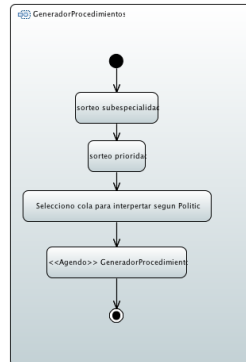


Figura 5.11: Diagrama de actividades Evento - Generador Procedimientos

Este evento lo genera cada equipo médico. Cuando ocurre crea un procedimiento con una modalidad (propia del Equipo), sub-especialidad y prioridad, según las proporciones estimadas respectivamente (sección 5.3).

Luego debemos insertarlo en la cola (lista de interpretación) que se seleccione, según la política establecida, aquí se emula al tecnólogo asignando el procedimiento para que el Radiólogo lo interprete.

Finalmente se procede a agendar nuevamente otro evento Generador de Procedimientos para que se repita a lo largo de la simulación.

Evento - Generador Citas

El evento se observa en la Figura 5.12.

Hay una variedad de tipos de turnos que generan citas (de Fluroscopia) que se van programando durante el día.

Las citas con paciente interrumpen el trabajo de interpretación de procedimientos.

Al momento de ocurrir el evento, se chequea que haya tiempo para poder generar una cita en lo que resta de turno, para programarla al Radiólogo que está asignado.

Finalmente se procede en agendar un nuevo evento Generador de Citas.

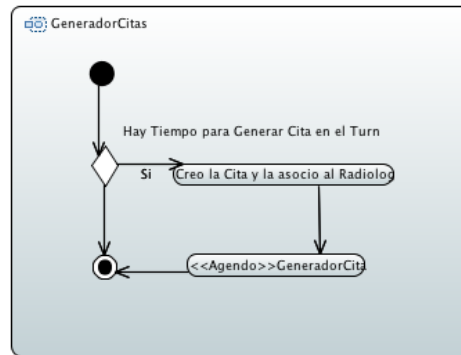


Figura 5.12: Diagrama de actividades Evento - Generador Citas

Evento - Chequeo Lista Interpretación

El evento se observa en la Figura 5.13.

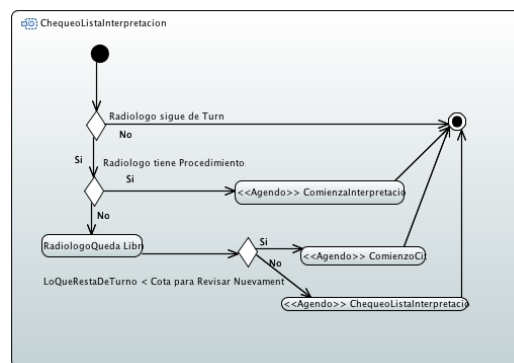


Figura 5.13: Diagrama de actividades Evento - Chequeo Lista de Interpretación

El evento es utilizado cuando un Radiólogo se encuentra libre mientras esta de turno.

Al momento que ocurre el evento, el Radiólogo chequea la lista de procedimientos que tiene para interpretar, agendando un evento para comenzar la interpretación si lo tuviera. Cuando sigue sin haber procedimientos, se calcula un nuevo Evento de Chequeo en una cota de tiempo si es menor a lo que resta del turno.

5.3. Recolección para los datos de entrada

Para llevar a cabo la recolección para los datos de entrada al modelo, nos apoyamos la siguiente información:

- Registro electrónico de turnos.
- Registro electrónico de los procedimientos:
 - Hora de finalización de procedimiento (hora de arribo al modelo).
 - Sub-especialidad.

- Modalidad.

- Estimación del tiempo de interpretación de procedimientos en cada modalidad, por parte del usuario experto.
- Registro electrónico de equipo radiológico, indicado por cada Radiólogo que sub-especialidad tiene.

Para cumplir con la especificación del modelo, debemos estimar las tasas de arribo de los procedimientos según su modalidad en días hábiles, además de estimar una clasificación por sub-especialidad para cada arribo.

5.3.1. Estimación de las tasas de arribo

Se tomaron datos de arribo recolectados por la institución que apoyó el trabajo de este proyecto. Dichos datos estaban disponibles en un sistema de información radiológica (RIS), y fueron exportados a Excel como se indica en la sección 5.4.1.

Luego utilizando el software R (sección 4.3.2), se analizaron para estimar las tasas de arribo, calculadas como el total de arribos en días hábiles dividido el total de días.

Para realizar la estimación en la tasa de arribos se validó que en días hábiles naturalmente son mayores, según se informa en la tabla 5.1.

Día	Tomografía	Resonancia Magnética	Rayos X	Fluoroscopia	Mamografía
domingo	110	120	755	0	1
lunes	296	306	1848	7	233
martes	379	402	2162	9	369
miércoles	389	402	2139	4	339
jueves	441	441	2222	8	403
viernes	421	475	2232	4	351
sábado	263	251	1331	1	179

Tabla 5.1: Procedimientos según la semana en dos meses (Junio - Julio 2016)

En Colombia, país donde se obtienen los datos del modelo, 18 lunes al año son días feriados, lo que genera una disminución en la tasa del promedio de procedimientos realizados dicho día. Otro dato importante es que los sábados se trabaja media jornada hasta las 13 horas. Todo esto motivo a que para la estimación se tomaran en cuenta como días hábiles los martes, miércoles, jueves y viernes.

Para analizar las tasas de arribo los días hábiles según las horas del día, generamos la tabla 5.2 y la graficamos en la Figura 5.14.

El modelo posee un “Timesbeat” expresado en minutos por lo que dividimos las tasas estimadas por 60 (minutos en una hora).

Para validar las tasas de arribo con la realidad durante ese período tomamos en cuenta los siguientes aspectos:

- La cantidad de Resonancias y Tomografías (Escanografías) son similares, ya que fueron tres resonadores y un tomógrafo, donde las duraciones de una resonancia se aproximan a 40 minutos y una tomografía a 10 minutos. También se mantienen constantes en el día ya que son procedimientos programados.

Hora	Tomografía	Resonancia	Rayos X	Fluoroscopia	Mamografía
07:00	0.0273148148	0.0379629630	0.1101851852	0.0009259259	0.0541666667
08:00	0.0467592593	0.0537037037	0.2564814815	0.0004629630	0.0689814815
09:00	0.0504629630	0.0560185185	0.3171296296	0.0023148148	0.0652777778
10:00	0.0638888889	0.0569444444	0.3680555556	0.0027777778	0.0671296296
11:00	0.0574074074	0.0541666667	0.3712962963	0.0013888889	0.0689814815
12:00	0.0532407407	0.0504629630	0.3310185185	0.0004629630	0.0518518519
13:00	0.0587962963	0.0416666667	0.2263888889	0.0000000000	0.0416666667
14:00	0.0541666667	0.0564814815	0.2416666667	0.0000000000	0.0611111111
15:00	0.0527777778	0.0648148148	0.3074074074	0.0018518519	0.0583333333
16:00	0.0652777778	0.0592592593	0.3467592593	0.0000000000	0.0518518519
17:00	0.0574074074	0.0615740741	0.3157407407	0.0000000000	0.0476851852
18:00	0.0518518519	0.0648148148	0.2462962963	0.0000000000	0.0370370370
19:00	0.0138888889	0.0296296296	0.0856481481	0.0000000000	0.0023148148

Tabla 5.2: Procedimientos según horas del día hábil

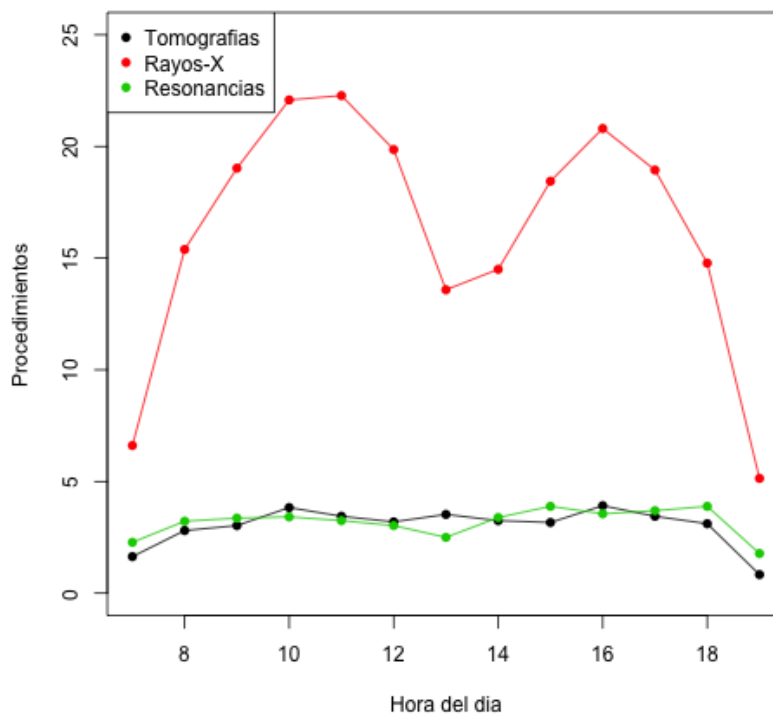


Figura 5.14: Tasa de Procedimientos para Interpretación durante el día hábil

- Mediante consultas con usuarios expertos encontramos que coinciden con las agendas de Mamografía y Fluroscopia, pues también son procedimientos programados.
- Las cantidades de Rayos-X varían en las horas del día por que son ambulatorios y no requieren cita.

5.3.2. Clasificación de procedimientos en sub-especialidades

Para establecer una aproximación en las proporciones de procedimientos que llegan para cada sub-especialidad se procedió a disponer un registro electrónico en una plantilla de cálculo con los procedimientos que se realizaron con mayor frecuencia en un mes (Junio 2016). A continuación un usuario experto (Coordinador de Radiólogos) los clasificó según la sub-especialidad, mediante la descripción del procedimiento y se realizó para cada modalidad. Luego se incorporó la clasificación dentro en un modelo entidad-relación para integrar la información al mismo.

El consolidado de la clasificación por sub-especialidad se resume en la tabla 5.3, la clasificación nos permite calcular la proporción de cada sub-especialidad por cada modalidad al momento que arriba un procedimiento al modelo.

Sub-especialidad	Tomografía	Resonancia Magnética	Rayos X
Abdomen	682	248	359
Cardiovascular	18	3	0
Mama	0	25	0
Musculoesqueletico	143	1039	4149
Neuroradiologia	1079	1019	2264
Torax	283	0	4631

Tabla 5.3: Consolidado de procedimientos mas frecuentes por sub-especialidad

Las proporciones resultantes se encuentran establecidas en la tabla 5.4.

Sub-especialidad	Tomografía	Resonancia Magnética	Rayos X
Abdomen	30.9297052 %	10.6255356 %	3.148294 %
Cardiovascular	0.8163265 %	0.1285347 %	0 %
Mama	0 %	1.0711225 %	0 %
Musculoesqueletico	6.4852608 %	44.5158526 %	36.385162 %
Neuroradiologia	48.9342404 %	43.6589546 %	19.854424 %
Torax	12.8344671 %	0 %	40.612120 %

Tabla 5.4: Proporciones de sub-especialidad por modalidad

5.3.3. Estimaciones de las distribuciones para los tiempos de interpretación

La actividad principal que debemos aproximar en una distribución de probabilidad es la que respecta al tiempo en minutos que se demora en interpretar un determinado procedimiento de alguna sub-especialidad.

Modalidad	Promedio	Desviacion Estandar
Tomografia	8	3
Resonancia	10	3
Rayos X	1	1
Rayos X - Torax	0.1	0

Tabla 5.5: Duraciones (en minutos) de interpretaciones

Para dicha tarea se solicitó a un usuario experto (Coordinador de Radiólogos) que realizara la estimación basado en su experiencia para los procedimientos más frecuentes, donde diera un promedio con una desviación estándar en cada procedimiento.

Observamos luego que la estimación por sub-especialidad (excepto Tórax en Rayos X ya que este procedimiento se interpreta rápidamente) es indiferente siendo el factor de diferenciación la modalidad del mismo. El resultado final dicha estimación se resume en la tabla 5.5.

5.3.4. Aproximación en las proporciones de prioridad en los Procedimientos

Este dato fue aproximado empíricamente en la tabla 5.6 por parte de la Dirección Administrativa del Departamento de Radiología, con el objetivo de poder modificarlo y ver su impacto en el cumplimiento de los niveles de servicio.

Normales	Prioritarias	Urgentes
60 %	10 %	30 %

Tabla 5.6: Proporciones de prioridad en los Procedimientos

5.4. Implementación del modelo

La implementación del modelo fue realizada mediante DESMOJ [DES15], bajo un enfoque guiado por eventos que suceden en tiempo discreto.

Las entidades, eventos codificadas para seguir la especificación del modelo sección 5.2 se observan en el diagrama de clases (Figura) 5.15.

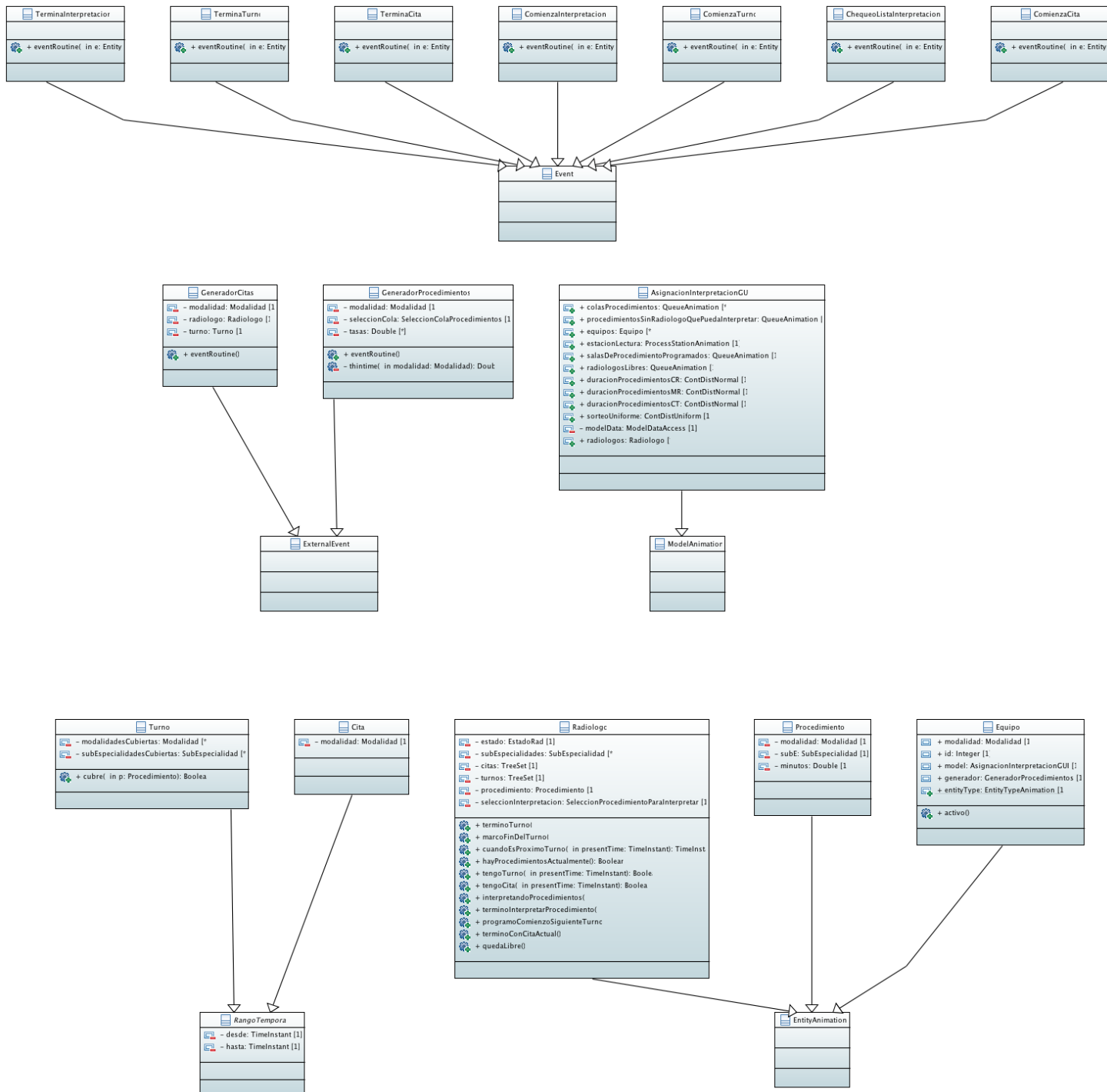


Figura 5.15: Diagrama de Clases de Diseño

Las políticas codificadas se observan en el diagrama (Figura) 5.16 donde mediante interfaces se posibilita codificar nuevas políticas sin necesidad de compilar el código del modelo.

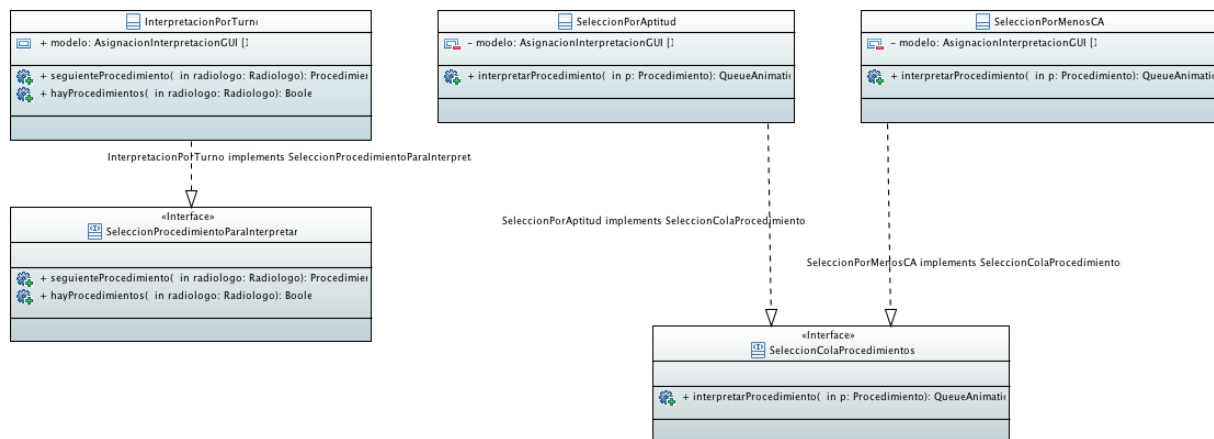


Figura 5.16: Clases e Interfaces sobre Políticas

5.4.1. Codificación datos de entrada

Los datos de entrada del capítulo (5.3) fueron consolidados en un solo archivo de entrada XML (Figura 5.17), que sigue un esquema XSD (Figura 5.18) de la librería.

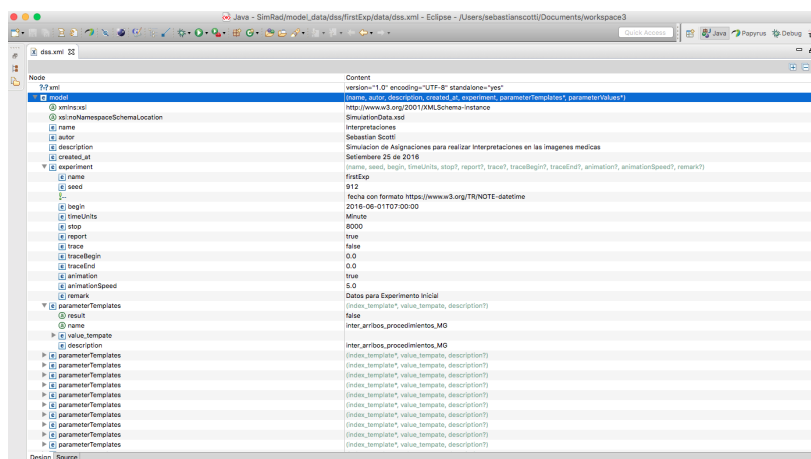


Figura 5.17: Archivo con los datos de entrada

A modo de poder separar los datos del modelo claramente, también se posibilita validar la sintaxis del archivo con tecnologías XML por el esquema, e incluso especificarlo y refinarlo aun mas para la simulación concreta.

Para la elaboración de los datos de entrada se realizaron trabajos de integración de datos entre la capa analítica y la base de datos del sistema de información radiológica empresarial RIS que se tiene operativo en el departamento.

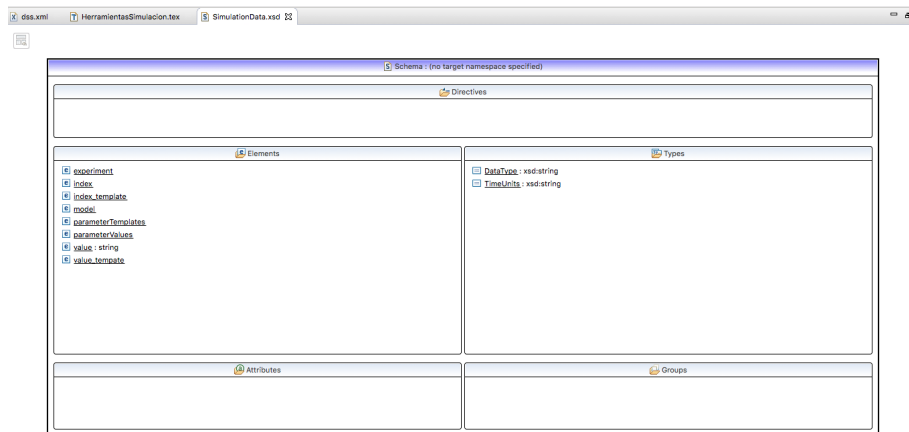


Figura 5.18: Esquema para validar archivos de entrada

5.4.2. Visualización Gráfica

La librería es acompañada por una extensión que le brinda la posibilidad de visualizar la ejecución de un modelo simulado en DESMOJ, la extensión trabaja como una capa adicional que extiende entidades, eventos y demás objetos de la librería, por lo que hay un alto acoplamiento y dependencia.

A modo de disponer una validación del diseño del modelo con los usuarios implementamos la visualización gráfica.

Eventualmente en futuras líneas de trabajo se podrá migrar la visualización a nuevas tecnologías que soporte la web, por ejemplo de forma nativa como HTML5.

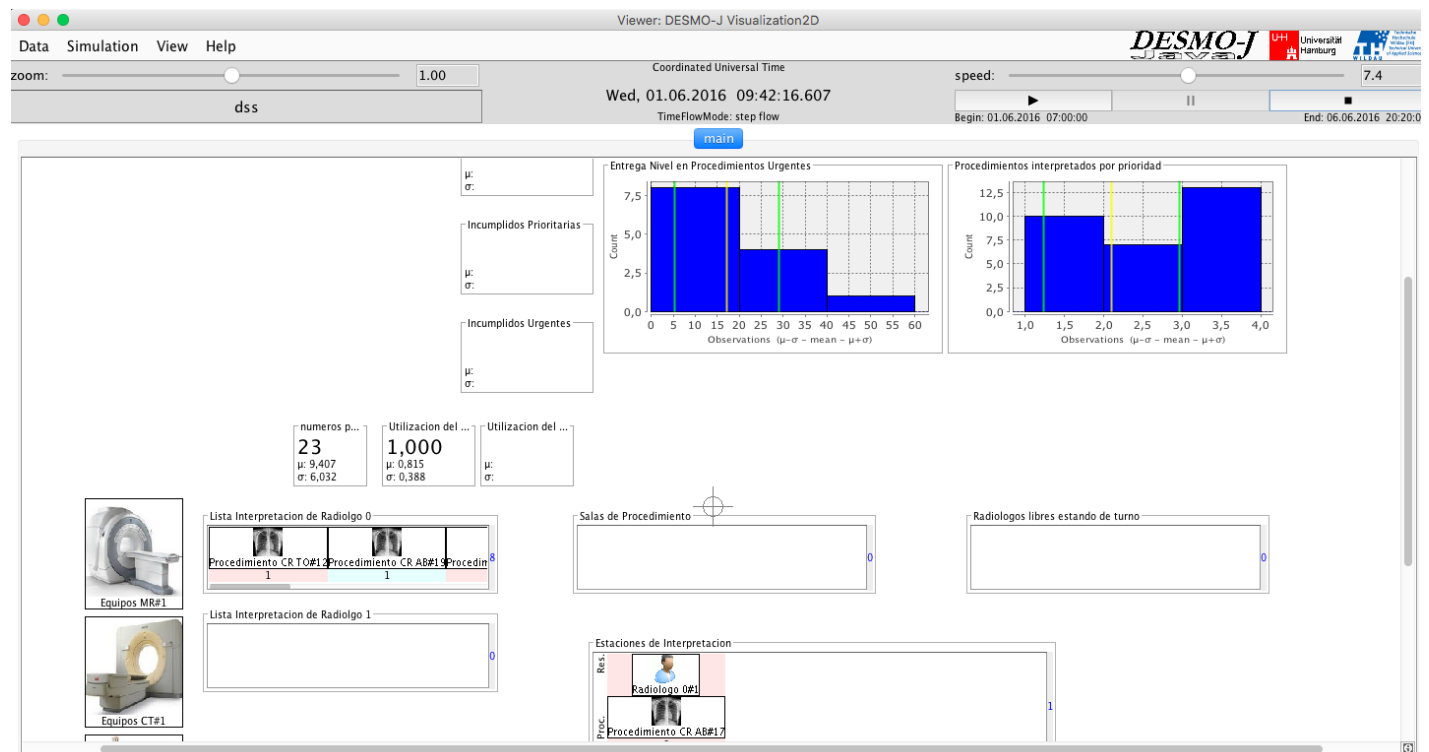


Figura 5.19: Transcurso de la simulación

La simulación del presente trabajo la podemos observar en las Figuras 5.19 y 5.20. En las mismas se aprecia

el movimiento de los procedimientos que generan los equipos y su asignación a los Radiólogos para que, cuando se encuentran libres en turno, se instalen en las estaciones de interpretación para realizar su trabajo y eventualmente suspenderlo para realizar procedimientos agendados o quedar libres hasta que se requieran durante el transcurso del turno.

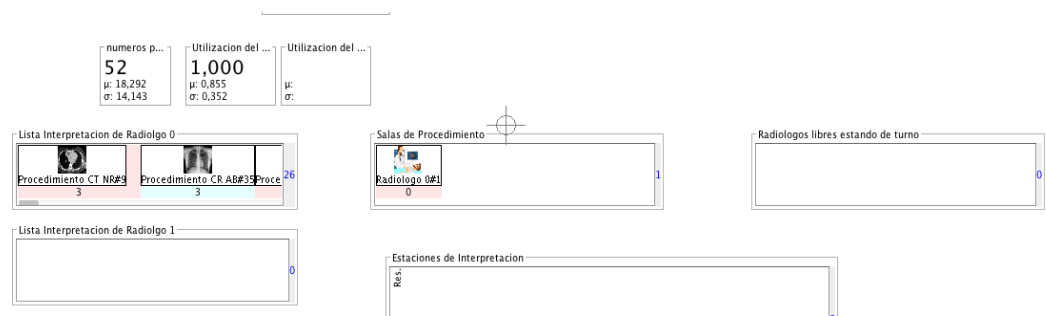


Figura 5.20: Radiólogo realizando un Procedimiento

5.4.3. Estadísticas

La librería DESMOJ dispone de una serie de componentes que se prestan para medir y contabilizar los diferentes indicadores necesarios para realizar un análisis de resultados de la simulación, además de apoyar la visualización gráfica durante la ejecución de la misma, facilitando la validación del modelo con los usuarios.

5.4.4. Otras salidas del modelo

El modelo brinda diversos archivos, uno para debug, otro para revisar errores, además de la traza y el archivo de estadísticas comentado en la sección C.2.

Luego para poder hacer nuestro estudio para evaluar el modelo generamos nuevas salidas adicionales propias para poder estudiar eficiencia computacional, estabilización del modelo, realizar las diferentes corridas variando diversas semillas.

En este capítulo desarrollamos los resultados obtenidos con el modelo computacional (Figura 2.2).

En la sección 6.1 discutimos la verificación y validación del modelo, donde incluimos una validación de trazas, verificación con test de cubrimiento y una validación del modelo con usuarios.

En la sección 6.2 de experimentación definimos los parámetros del modelo, para luego presentar la ejecución el modelo computacional que simula la situación actual. A posteriori, evaluamos los resultados y efectuamos supuestos para simular una situación alternativa.

Luego en el sección 6.3 presentamos la comparación de ambas simulaciones consolidadas.

Finalmente en la sección 6.4 comentamos como se realizo la retroalimentacion del trabajo con los Radiólogos.

6.1. Verificación y Validación del Modelo

Esta sección se dedica a evaluar el correcto funcionamiento del modelo computacional, mediante una validación de trazas, validación gráfica del modelo con los usuarios y verificación por tests de cubrimiento.

6.1.1. Validación de trazas

En la presente sección realizamos una validación manual sobre la traza de cada escenario para cotejar que funcione según la especificación del modelo.

Este enfoque busca explorar de forma general la correcta consecución de los eventos del modelo computacional según su especificación, tomando escenarios simples que pueden ser explorados manualmente.

En todos los escenarios se utilizan las tasas de arribo y estimaciones de proporciones de Sub-Especialidad y prioridades en los procedimientos que se calcularon en la sección 5.3. Además se fija en todos los casos la misma semilla (valor escogido “462”).

Un Radiólogo con cuatro turnos en dos días

El presente escenario modela un Radiólogo con cuatro turnos en dos días de simulación según se muestra en la tabla 6.1. La simulación comienza el 14.06.2016 07:00 y termina el 15.06.2016 23:00. El Radiólogo dispone de todas las sub especialidades menos Cardiovascular (CV). El experimento que implementa la misma se denomina “Escenario1”.

Rad N°	Turno N°	Comienza	Termina	Modalidades	Sub Especialidades
1	1	14.06.2016 07:00	14.06.2016 13:00	CR	ME,AB,NE,MA,TO
1	2	14.06.2016 14:00	14.06.2016 19:00	CT	ME,AB,NE,MA,TO
1	3	15.06.2016 07:00	15.06.2016 13:00	MR	ME,AB,NE,MA,TO
1	4	15.06.2016 14:00	15.06.2016 19:00	CR	ME,AB,NE,MA,TO

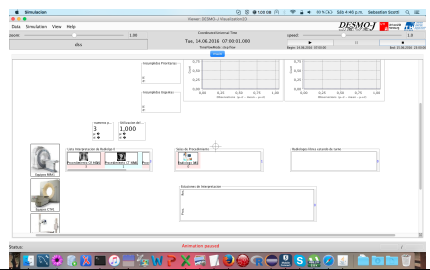
Tabla 6.1: Escenario 1 Radiólogo con 4 turnos en 2 días

La ejecución del modelo computacional da como salida un archivo con la traza de los eventos ocurridos en la simulación, dicha traza la revisamos minuciosamente de forma manual y consolidamos lo observado en la tabla 6.2.

En la tabla describimos los eventos que se ejecutan en un instante, así como la entidad que los generó.

Mediante diversas notas al pie del documento encontramos observaciones o comentarios que marcan la correcta ejecución.

También en momentos clave adjuntamos visualizaciones gráficas completas del modelo.

Tiempo	Evento	Entidad	Visualización en ese instante
14.06.2016 07:00	Comienza Turno#1	Radiologo 0#1	
14.06.2016 07:00	Comienza Cita#1	Radiologo 0#1	
14.06.2016 07:00:01	Generador Procedimientos#1		
14.06.2016 07:00:01	Generador Procedimientos#2		
14.06.2016 07:00:01 ^a	Generador Procedimientos#3		
⋮	⋮	⋮	⋮
14.06.2016 07:25 ^b	Termina Cita#1	Radiologo 0#1	
14.06.2016 07:25 ^c	Comienza Interpretacion#1	Radiologo 0#1	
14.06.2016 07:26 ^d	Termina Interpretacion#1	Radiologo 0#1	
14.06.2016 07:31	Chequea Lista#1	Radiologo 0#1	
14.06.2016 07:34 ^e	Generador Procedimientos#3		
14.06.2016 07:36	Chequea Lista#2	Radiologo 0#1	
14.06.2016 07:36	Comienza Interpretacion#2	Radiologo 0#1	

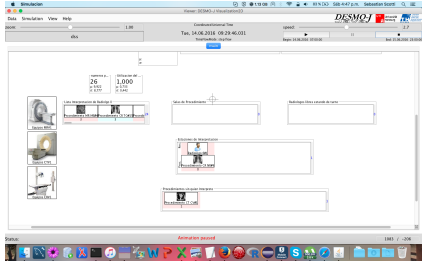
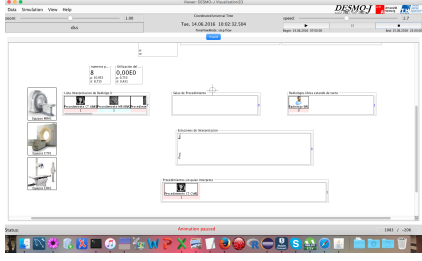
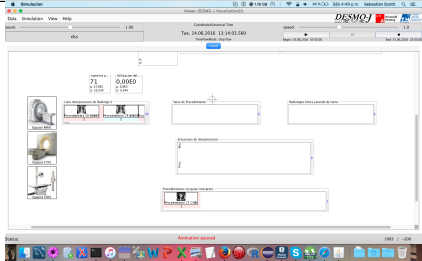
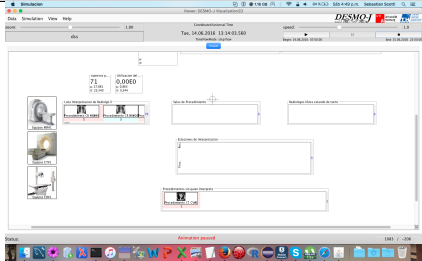
^aEl algoritmo de thintime ejecuta correctamente

^bLa duración de las Citas de Procedimientos RF es adecuada

^cCuando termina la Cita comienza a Interpretar lo que tiene asignado

^dLa duración de la Interpretación de un Procedimientos de CR de sub especialidad diferente a Tórax es correcta

^eDuración del chequeo para revisar la lista de interpretacion por parte del Radiologo

: 14.06.2016 08:42:07 14.06.2016 08:42:20 ^f 14.06.2016 08:42:20	: Generador de Citas#1 Termina Interpretacion#14 Comienza Cita#2	: Radiologo 0#1 Radiologo 0#1 Radiologo 0#1	
: 14.06.2016 08:48 ^g : 14.06.2016 09:29 14.06.2016 09:29 : 14.06.2016 10:02 ^h :	: Generador Procedimientos#2 : Termina Interpretacion#16 Comienza Interpretacion#17 : Termina Interpretacion#46 :	: : Radiologo 0#1 Radiologo 0#1 : Radiologo 0#1 :	: :  
14.06.2016 13:00 ⁱ 14.06.2016 13:05 14.06.2016 13:05 ^j	Termina Turno#1 Termina Interpretacion#84 Termina Turno#2	Radiologo 0#1 Radiologo 0#1 Radiologo 0#1	
14.06.2016 13:14 :	Generador Procedimientos#3 :	Radiologo 0#1 :	
14.06.2016 14:00 ^k 14.06.2016 14:00 ^l : 14.06.2016 14:12 ^m	Comienza Turno#2 Comienza Interpretacion#85 : Comienza Interpretacion#93	Radiologo 0#1 Radiologo 0#1 : Radiologo 0#1	:

^fComienza la Cita generada segundos antes luego de terminar la interpretacion

^gSe genero un procedimiento de Cardiovascular y como no hay quien lo interprete en el futuro no lo coloca en una lista de interpretación

^hLuego de terminar la interpretación el Radiologo queda libre

ⁱCuando se cumple la hora de finalización del turno lo marco, y sigo con actividades

^jSe hace efectivo el termino del turno por parte del Radiologo

^kSe hace efectivo el comienzo del turno siguiente por parte del Radiologo

^lSelecciona Procedimientos según política 5.2.4 interpretando urgentes o prioritarios

^mSelecciona Procedimientos según política 5.2.4 interpretando resonancias normales

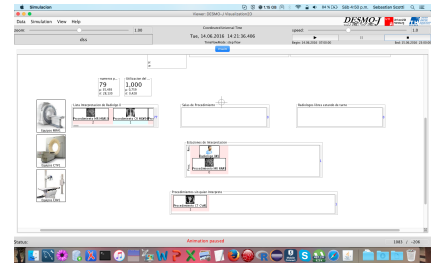
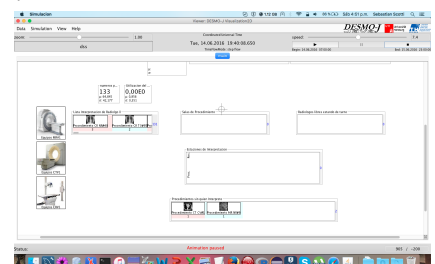
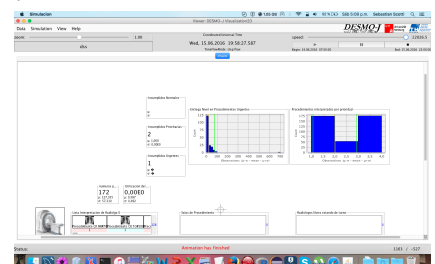
14.06.2016 14:21	Generador Procedimientos#1	Radiologo 0#1	
⋮ 14.06.2016 19:05 14.06.2016 19:05 ⋮ 14.06.2016 19:26 ⁿ ⋮	⋮ Termina Interpretacion#146 Termina Turno#4 ⋮ Generador Procedimientos#1 ⋮	⋮ Radiologo 0#1 Radiologo 0#1 ⋮ ⋮	⋮ 
14.06.2016 19:40 ^{n̂}	Generador Procedimientos#3		
15.06.2016 07:00:00 15.06.2016 07:00:00 15.06.2016 07:01:24 15.06.2016 07:01:24 15.06.2016 07:01:30 ^o 15.06.2016 07:01:30	Comienza Turno#3 Comienza Interpretacion#147 Termina Interpretacion#147 Comienza Interpretacion#148 Termina Interpretacion#148 Comienza Interpretacion#149	Radiologo 0#1 Radiologo 0#1 Radiologo 0#1 Radiologo 0#1 Radiologo 0#1 Radiologo 0#1	
⋮ 15.06.2016 19:09 15.06.2016 19:09 ^p ⋮	⋮ Termina Interpretacion#401 Termina Turno#4 ⋮	⋮ Radiologo 0#1 Radiologo 0#1 ⋮	⋮ 
15.06.2016 19:58 ^q	Generador Procedimientos#3	Radiologo 0#1	

Tabla 6.2: Taza 1 Radiólogo con 4 turnos en 2 días

Si bien el escenario validado fue simple, se puede pensar en realizar validación de trazas en escenarios más complejos (por ejemplo: incorporar más radiólogos simulando al tiempo), pero el trabajo manual que se requiere es importante ya que el número de eventos a revisar en la traza aumenta considerablemente y se hace mas difícil diferenciar los eventos entre las entidades.

ⁿSe siguen generando procedimientos de resonancias normales pero no se asignan al radiólogo por que ya no interpretara mas resonancias durante el resto de la simulación

^{n̂}Se siguen generando procedimientos hasta las 20 horas y ya se programa el generador para el próximo día según tasas de arribo

^oLa duración de la Interpretacion de un Procedimiento de modalidad CR y de sub especialidad de Tórax es correcta

^pNo hay mas turnos para agendar su comienzo

^qSe agenda el evento generador de procedimientos para el día 16 posterior a la fecha de fin de la simulación

Además hay aspectos del modelo que fueron validados con las trazas, no son exhaustivos respecto a todas las formas posibles en que un evento puede ser desencadenado durante una simulación, por lo que complementamos la verificación del modelo computacional con los test de cubrimiento.

6.1.2. Test de Cubrimiento del Modelo Computacional

El problema mas grande de la validación de trazas (sección 6.1.1) es que si se cambia un solo evento estocástico (ajuste del modelo, cambio de semilla o algún dato de entrada), por más mínimo que sea, esto a su vez cambia absolutamente la traza, por lo que para validar el modelo se requiere nuevamente validar la traza de forma manual por completo desde el inicio de la simulación.

Mediante TestNG [tes16], logramos automatizar cubrimientos de códigos en los diversos eventos aprovechando la ventaja de disponer por separado los datos y el modelo. Para cada experimento podemos declarar un conjunto de pruebas para cubrir el 100 % de los diversos árboles de decisión en cada evento de cada entidad.

Esto nos brinda de algún modo un aseguramiento de calidad (de software) al momento de iterar el modelo y disponer de pruebas retroactivas que permiten revisar (o alertar) por errores que se estén introduciendo en el mismo.

La dinámica que utilizamos en el diseño de las pruebas consiste en lanzar mensajes que realizan marcas en la traza de la simulación y luego, mediante una lectura del archivo de la traza, verificamos que se encuentren cada una de las marcas, siendo estas marcas las hojas de árbol de cada decisión en los eventos que queramos probar con esta técnica.

Se dispone más información sobre su funcionamiento en el Anexo C.3.

6.1.3. Validación con Usuarios

Las jornadas de trabajo consistieron en reuniones espontáneas (mientras desarrollaban su trabajo y en momentos de baja intensidad) dentro del Departamento de Radiología, con una duración aproximada de quince minutos con cada uno de los Radiólogos de turno.

Durante estas reuniones se mostraba una visualización del modelo gráficamente (visualización gráfica Figura), explicando como fluye la simulación a través de las entidades y los diversos eventos que van ocurriendo. También se realizaron ejecuciones pausadas de la situación actual (sección 6.2.2), tiempo que se aprovechaba para ir resolviendo sus dudas y discutiendo aspectos de la especificación del modelo (como los supuestos del mismo).

Después de haber aplicado en el modelo todas las sugerencias recibidas y solo hasta cuando los Radiólogos estuvieron familiarizados con el entorno visual del modelo, se procedió a su validación y consiguió la aceptación por parte de ellos.

Cabe resaltar que los datos utilizados en la definición de turnos y sub-especialidades de cada Radiólogo, fueron tomados de la realidad, facilitando la comprensión del modelo.

6.2. Experimentación

La presente sección describe el comportamiento que brinda el modelo computacional mediante el análisis de las respuestas de salida.

Cada una de las respuestas las medimos con diversos objetos estadísticos que provee la librería DESMO-J como son contadores e histogramas.

En la experimentación realizamos una serie de 50 experimentos variando la semilla, para luego consolidar las salidas en las tablas.

6.2.1. Parámetros

En esta sección establecemos los parámetros de la especificación del modelo (sección A.4.2) - tomando los datos reales - para reflejar el contexto del Departamento de Radiología que estamos estudiando.

Staff de Radiólogos

En la tabla 6.3 detallamos el Staff (Grupo) de Radiólogos con la que cuenta la Institución, incluyendo sus sub-especialidades. Además se establecen en grupos que ellos mismos definieron para organizar su trabajo.

Id	Nombre	Sub-Especialidades	Grupo
0	gdaza	TO,ME	Musculo
1	wescobar	NR	Neuro
2	jvallejo	NR	Neuro
3	gsalom	TO,AB,CV,MA	Mama
4	cgonzalez	TO,AB,CV,MA	Mama
5	ovalencia	TO,AB,CV,MA	Mama
6	jerazo	TO,AB,CV,MA	Mama
7	hfernandez	TO,CV	Torax
8	cmoreno	TO	Torax
9	ljimenez	TO,ME	Musculo
10	jecheverri	TO,ME	Musculo

Tabla 6.3: Staff de Radiólogos disponibles

Tasas de Arribo

Las tasas de arribo fueron calculadas en la sección 5.3.1 y se describen en la siguiente tabla 6.4.

Proporciones de Prioridades y Sub-Especialidades

La proporción de prioridades y sub-especialidades de los procedimientos son consolidadas en las tablas 6.5 y 6.6 respectivamente.

Hora	Tomografía	Resonancia	Rayos X	Fluoroscopia	Mamografía
07:00	0.0273148148	0.0379629630	0.1101851852	0.0009259259	0.0541666667
08:00	0.0467592593	0.0537037037	0.2564814815	0.0004629630	0.0689814815
09:00	0.0504629630	0.0560185185	0.3171296296	0.0023148148	0.0652777778
10:00	0.0638888889	0.0569444444	0.3680555556	0.0027777778	0.0671296296
11:00	0.0574074074	0.0541666667	0.3712962963	0.0013888889	0.0689814815
12:00	0.0532407407	0.0504629630	0.3310185185	0.0004629630	0.0518518519
13:00	0.0587962963	0.0416666667	0.2263888889	0.0000000000	0.0416666667
14:00	0.0541666667	0.0564814815	0.2416666667	0.0000000000	0.0611111111
15:00	0.0527777778	0.0648148148	0.3074074074	0.0018518519	0.0583333333
16:00	0.0652777778	0.0592592593	0.3467592593	0.0000000000	0.0518518519
17:00	0.0574074074	0.0615740741	0.3157407407	0.0000000000	0.0476851852
18:00	0.0518518519	0.0648148148	0.2462962963	0.0000000000	0.0370370370
19:00	0.0138888889	0.0296296296	0.0856481481	0.0000000000	0.0023148148

Tabla 6.4: Procedimientos según horas del día hábil

Normales	Prioritarias	Urgentes
60 %	10 %	30 %

Tabla 6.5: Proporciones de prioridad en los Procedimientos

Las Sub-Especialidades CV y MA tienen una tasa de llegada muy baja, por lo que no analizaremos sus datos.

Políticas

Política de la asignación para interpretación, según se definió en la sección 5.2.4.

Política de selección de procedimientos a interpretar, según se definió en la sección 5.2.4.

Con la intención de analizar el desempeño de las políticas de asignación y selección de procedimientos, en la evaluación de resultados (tabla 6.9) separamos los promedios de los turnos dependiendo de la prioridad y de las modalidades que cubren (CR, CTMR).

Aproximaciones de las duraciones

Las tasas de arribo fueron calculadas en la sección 5.3.3 y se describen en la siguiente tabla 6.7.

Niveles de servicio

El tiempo de interpretación deseado de un procedimiento de tipo normal es de 48 horas, tipos prioritarios cuatro horas y urgentes son dos horas.

Sub-especialidad	Tomografía	Resonancia Magnética	Rayos X
Abdomen	30.9297052 %	10.6255356 %	3.148294 %
Cardiovascular	0.8163265 %	0.1285347 %	0 %
Mama	0 %	1.0711225 %	0 %
Musculoesqueletico	6.4852608 %	44.5158526 %	36.385162 %
Neuroradiologia	48.9342404 %	43.6589546 %	19.854424 %
Torax	12.8344671 %	0 %	40.612120 %

Tabla 6.6: Proporciones de sub-especialidad por modalidad

Modalidad	Promedio	Desviacion Estandar
Tomografia	8	3
Resonancia	10	3
Rayos X	1	1
Rayos X - Torax	0.1	0

Tabla 6.7: Duraciones (en minutos) de interpretaciones

Horario Hábil

El horario hábil del departamento es lunes a viernes de 7 a 19 horas y sábados o feriados de 7 a 13 horas.

Periodo de la simulación

Con el objetivo de que no obtengamos resultados por días feriados y comportamientos de fin de semana, el período se establece en cuatro días hábiles durante sus 24 horas, desde el día martes 14 de junio a las 7 horas hasta las 23:00 horas del viernes 17 de junio del año 2016.

6.2.2. Escenario Actual

El escenario actual se obtiene a partir de los parámetros de entrada y de la definición de una serie de supuestos para fijar las variables de decisión que reflejan la realidad mediante el modelo.

Supuestos

Tomando en cuenta las restricciones del modelo actual (5.2.2) especificamos los siguientes supuestos de la situación a modelar:

- En cada turno que se cubre para interpretar la Modalidad CR (Rayos X) se realizan procedimientos de Modalidad RF (Fluoroscopia), estimando su duración con una distribución normal de parámetros (27,5).
- Luego de que cada Radiólogo termina su turno, no interpreta el remanente de procedimientos que disponga en su lista hasta su nuevo turno.
- Cuando esta finalizando la simulación, separamos los procedimientos que no tienen Radiólogo asignado para interpretarlos (por que serían interpretados fuera del período de simulación), pues así no interfieren

con los tiempos de los procedimientos que llegan al sistema y fueron asignados a algún Radiólogo.

- La política de asignación de interpretaciones balancea la utilización de los Radiólogos.
- La Asignación de la Interpretación la hace el RIS en cuanto termina un procedimiento, y no un Tecnólogo, por lo que no hay tiempos de espera mientras se realiza.

Variables de decisión

Actualmente la asignación de turnos se realiza de la siguiente manera: durante una jornada laboral se deben tener Radiólogos interpretando procedimientos de Tomografía y Resonancia segun sus sub-especialidades, y además otro Radiólogo para realizar interpretaciones de Rayos-X para todas las sub-especialidades.

Esto se debe a que hay necesidades de realizar procedimientos de Fluroscopia y no hay quien las haga y las interpretación de Rayos X son bastante convencionales en todas las sub-especialidades.

En la especificación del modelo (sección 5.2.2) definimos las siguientes variables de decisión:

- Definición de sus turnos, desde-hasta, Radiólogo, incluyendo modalidades y sub-especialidades cubiertas, resumidas en la tabla 6.8.

Radiólogo	# Turnos	Modalidades	Sub Especialidades	Horas Trabajadas
gdaza	4	CT,MR	TO,CV,MA,ME	24
wescobar	4	CT,MR	NR	24
jvallejo	4	CT,MR	NR	24
gsalom	1	CT,MR	TO,AB,CV,MA	6
gsalom	1	CR	ME,AB,NE,MA,TO	6
cgonzalez	1	CR	ME,AB,NE,MA,TO	6
ovalencia	1	CR	ME,AB,NE,MA,TO	6
hfernandez	2	CR	ME,AB,NE,MA,TO	12
cmoreno	1	CR	ME,AB,NE,MA,TO	6
ljinenez	1	CR	ME,AB,NE,MA,TO	6
ljinenez	3	CT,MR	TO,CV,MA,ME	18
jecheverri	1	CR	ME,AB,NE,MA,TO	6
jecheverri	1	CT,MR	TO,CV,MA,ME	6

Tabla 6.8: Resumen de la Situación Actual

6.2.3. Evaluación de Resultados - Escenario Actual

En esta sección evaluamos las respuestas de la salida que especificamos en el modelo (sección 5.2.2).

- Tiempo de permanencia en la cola (lista de interpretacion) de procedimientos.
- Tasa de ocupación de cada Radiólogo.
- % Cumplimiento por niveles de servicio.

Para dar respuesta al “Tiempo de permanencia en la cola de procedimientos a ser interpretados”, se generan las siguientes salidas:

- Histogramas de los tiempo (horas) que tardan en ser interpretados los procedimientos por sub-especialidad, según modalidades y prioridades de los mismos.
- Histograma del tiempo que tarda en ser interpretado un procedimiento urgente.

La información fue resumida en la tabla 6.9, tomando en cuenta los siguientes aspectos para su comprensión: la columna “Mods-Prioridad” dispone valores según los tipos de de turnos (CR, CTMR) asociando las prioridades de los procedimientos según sean Normales o Urgentes-Prioritarios.

Sub-Especialidad	Mods-Prioridad	Promedio	Desviación	Mínimo	Máximo
NR	CTMR-Urg	0.3701	0.3441	0	1.2656
NR	CTMR-Nor	0.6387	0.5013	0	2.3125
NR	CR-Nor	1.4891	1.8373	0.19	8.5876
NR	CR-Urg	1.2105	1.9456	0	9.9831
ME	CTMR-Urg	0.4634	0.4013	0	1.5172
ME	CTMR-Nor	0.6007	0.624	0	3.2679
ME	CR-Nor	1.5474	1.8175	0.1618	8.0109
ME	CR-Urg	1.0966	1.4505	0.0263	7.0227
TO	CTMR-Urg	0.3558	0.8141	0	3.5714
TO	CTMR-Nor	0.3744	0.7895	0	4.6667
TO	CR-Nor	1.587	2.0612	0.118	9.327
TO	CR-Urg	1.146	1.7322	0.0534	10.6531
AB	CTMR-Urg	5.4627	2.628	0.9375	10.3333
AB	CTMR-Nor	14.079	2.8423	8.25	20.75
AB	CR-Nor	1.6533	3.4159	0	16.5385
AB	CR-Urg	1.2621	2.3912	0	11.6667

Tabla 6.9: Horas por Sub-Especialidad según modalidades y prioridades

Para dar respuesta a la “Tasa de ocupación de cada Radiólogo”:

- Histograma de la tasa de ocupación por turnos de cada Radiólogo.
- Largo de la cola cuando finalizó la simulación.

Radiólogo	Promedio	Mínimo	Máximo	# Proc. en Cola
cgonzalez	% 72.34	% 36.25	% 100	10.6757
cmoreno	% 68.92	% 28.82	% 98.61	5.3649
gdaza	% 35.35	% 25.6	% 51.21	0.1351
gsalom	% 72.29	% 45.33	% 94.69	14.5811
hfernandez	% 75.09	% 51.75	% 100	7.527
jecheverri	% 53.78	% 35.59	% 69.77	9.2432
jvallejo	% 45.18	% 32.53	% 66.98	0.3108
ljimenez	% 46.14	% 32.56	% 58.88	6.2162
ovalencia	% 70.52	% 31.29	% 100	8.4595
wescobar	% 45.43	% 33.46	% 57.66	0.3514

Tabla 6.10: Utilización por Radiólogo

Consolidamos la información de los experimentos en la tabla 6.10, tabla que describe los promedios de utilización de cada Radiólogo entre los turnos que realizó.

También en esta tabla (6.10) informamos el promedio del largo de las colas de interpretación por cada Radiólogo (# Proc. en Cola) al momento que termina cada experimento, para complementar las observaciones de las ejecuciones de los escenarios y el resto de las salidas. Esto nos puede muestra como mejorar la situación actual; por ejemplo, vemos en la Figura 6.1 que usualmente quedan Rayos X (CR) por interpretar por los Radiólogos.

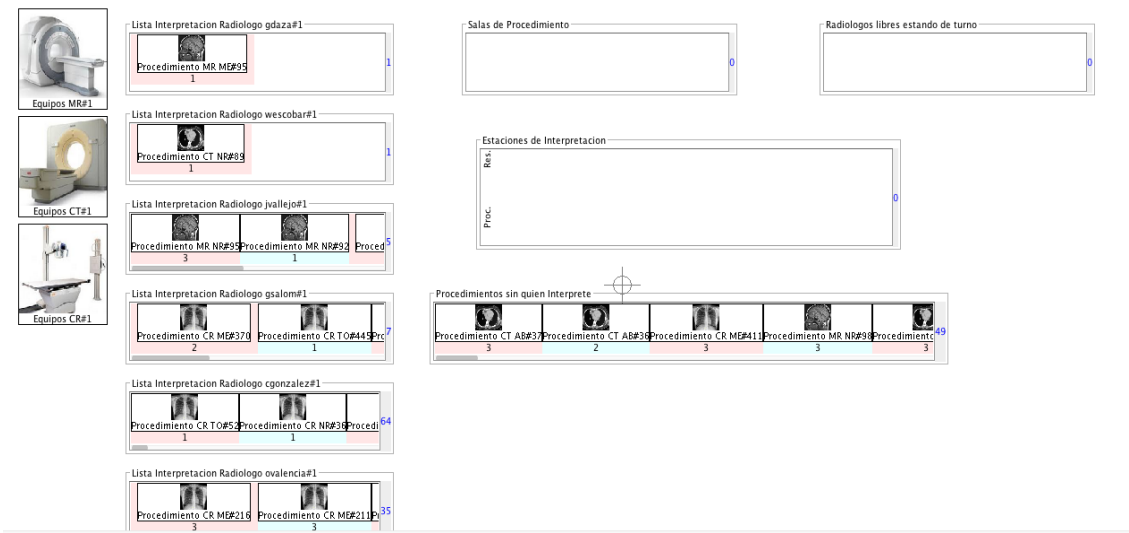


Figura 6.1: Estado final de las Colas en la Situación Actual

Finalmente el “% Cumplimiento por niveles de servicio”

- Contador de procedimientos incumplidos por cada nivel de servicio.
- Contador de procedimientos interpretados.
- Contador de procedimientos dentro del sistema cuando finalizó la simulación.

Consolidamos la información en la tabla 6.11 donde podemos observar el porcentaje de procedimientos interpretados dentro de los niveles de servicio estipulados para cada prioridad. En la tabla 6.12 desglosamos la proporción de procedimientos incumplidos (sin interpretar a tiempo) por cada nivel de servicio.

Cumplimiento	Incumplimiento	En el Sistema	Total
1068.4865	25.9189	100.5541	1169.0405
91.3986 %	2.2171 %	8.6014 %	100 %

Tabla 6.11: Porcentaje de Cumplimiento en los niveles de servicio

Nivel Servicio	Incumplidos	Del total simulado
Urgentes	1.2403 %	30 %
Prioritarios	0.4034 %	10 %
Normales	0.5734 %	60 %

Tabla 6.12: Porcentaje de Incumplimiento por niveles de servicio

6.2.4. Análisis de Resultados Escenario Actual y Definición de Escenario Alternativo

A continuación se realiza una justificación de una propuesta para reflejar una nueva Situación Alternativa, con los mismos recursos, sin aumentar cargas de trabajo, buscando nuevos caminos que soporten decisiones basadas en un trabajo de investigación operativa.

Justificación

Luego de evaluar los resultados de la Situación Actual encontramos las siguientes evidencias:

- El porcentaje de incumplidos es bajo respecto al total de procedimientos simulados.
- Las interpretaciones que están quedando demoradas son de procedimientos de modalidad CR (observando la Figura 6.1, el largo de las colas en la Tabla 6.10 y las horas promedio que se demoran en interpretar en la Tabla 6.9).
- Se podrían mejorar los tiempos ya que hay Radiólogos sub-utilizados y los que están mas cargados fueron los que cubrieron los de turnos de CR.
- Las sub-especialidades que más se demoran para interpretar son las de Abdómen (AB).
- Hay interpretaciones de procedimientos con prioridad “urgente” que quedan represadas en la lista de interpretación de los Radiólogos, revisando los máximos de la tabla 6.9, sugiriendo mejorar la política de selección de procedimientos (sección 5.2.4) o realizar un intercambio entre las colas (listas).

Analizadas las evidencias podemos proponer una Situación Alternativa, donde mantendremos los parámetros y respuestas de salida, con los siguientes ajustes en las variables de decisión:

- Quitar los turnos de interpretación exclusiva CR en todas las sub-especialidades y con realización de Fluroscopias.
- Agregar un turno de sub-especialidad de Abdómen (AB), con los mismos Radiólogos valencia y cgonzalez remplazando uno de los turnos de CR que son del mismo grupo según la tabla 6.3.
- Correr uno de los turnos de AB nuevos para cubrir una ausencia de dos días.
- Todos los turnos son de modalidades CR,CT,MR pero NO realizan Fluoroscopia.

La intensión de la Situación Alternativa busca disminuir los tiempos de interpretación en todas las sub-especialidades y aumentar la utilización de los Radiólogos durante el turno.

Variables de decisión ajustadas

Resumimos la definición de sus turnos, desde-hasta, Radiólogo, incluyendo modalidades y sub-especialidades cubiertas para el Situación Alternativa en la tabla 6.13 manteniendo la carga horaria de la Situación Actual (tabla 6.8).

Un aspecto interesante es que quedan libres dos Radiólogos.

Radiólogo	# Turnos	Modalidades	Sub Especialidades	Horas Trabajadas
gdaza	4	CT,MR,CR	TO,CV,MA,ME	24
wescobar	4	CT,MR,CR	NR	24
jvallejo	4	CT,MR,CR	NR	24
gsalom	2	CT,MR,CR	TO,AB,CV,MA	12
cgonzalez	1	CT,MR,CR	TO,AB,CV,MA	6
ovalencia	1	CT,MR,CR	TO,AB,CV,MA	6
ljimenez	4	CT,MR,CR	TO,CV,MA,ME	24
jecheverri	2	CT,MR,CR	TO,CV,MA,ME	12

Tabla 6.13: Resumen de la Situación Alternativa

Evaluación de Resultados - Situación Alternativa

Mediante una consolidación similar a la realizada en la Situación Actual (sección 6.2.3), elaboramos las siguientes tablas para analizarla:

- Tiempo de permanencia en la cola (lista) de procedimientos a ser interpretados, tabla 6.14.
- Tasa de ocupación de cada Radiólogo, tabla 6.15 y figura 6.2.
- % Cumplimiento por niveles de servicio, tablas 6.16 y 6.17.

Sub-Especialidad	Mods-Prioridad	Promedio	Desviación	Mínimo	Máximo
NR	CTMR-Urg	0.3791	0.3525	0	1.3014
NR	CTMR-Nor	0.7595	0.546	0	2.3125
NR	CR-Nor	0.6638	0.388	0	1.625
NR	CR-Urg	0.2987	0.3147	0	1.431
ME	CTMR-Urg	0.4336	0.3667	0	1.5172
ME	CTMR-Nor	0.5519	0.5107	0	2.5893
ME	CR-Nor	0.462	0.2319	0.026	1.08
ME	CR-Urg	0.291	0.1708	0	0.7797
TO	CTMR-Urg	0.3291	0.7744	0	3.4286
TO	CTMR-Nor	0.3017	0.5627	0	3
TO	CR-Nor	0.4204	0.2254	0.1218	1.2312
TO	CR-Urg	0.2914	0.1918	0	0.8247
AB	CTMR-Urg	4.4059	1.8296	1.12	8.1481
AB	CTMR-Nor	5.1488	1.9521	1.475	10.7714
AB	CR-Nor	4.4545	2.1736	0.375	9.3
AB	CR-Urg	3.9981	2.9014	0	13.6

Tabla 6.14: Demora (en horas) por Sub-Especialidad según modalidades y prioridades - Alternativa

6.3. Comparación de Situaciones

Para comparar las situaciones, evaluamos los resultados luego de realizar una experimentación de 50 “runs” basados en torrentes comunes, asegurando la misma cantidad de arribos durante todo el período de la simulación

Radiólogo	Promedio	Mínimo	Máximo	# Proc. en Cola
cgonzalez	% 24.63	% 10.54	% 49.45	0.2027
gdaza	% 47.48	% 37.16	% 62.84	1.3108
gsalom	% 45.56	% 29.14	% 64.43	0.1757
jecheverri	% 27.57	% 18.2	% 37.18	0.1081
jvallejo	% 52.33	% 38.01	% 73.13	0.9324
ljimenez	% 37.54	% 27.36	% 49.55	1.1081
ovalencia	% 51.32	% 19.64	% 85.15	0.0811
wescobar	% 52.77	% 39.13	% 65.43	0.8514

Tabla 6.15: Utilización por Radiólogo en la Situación Alternativa

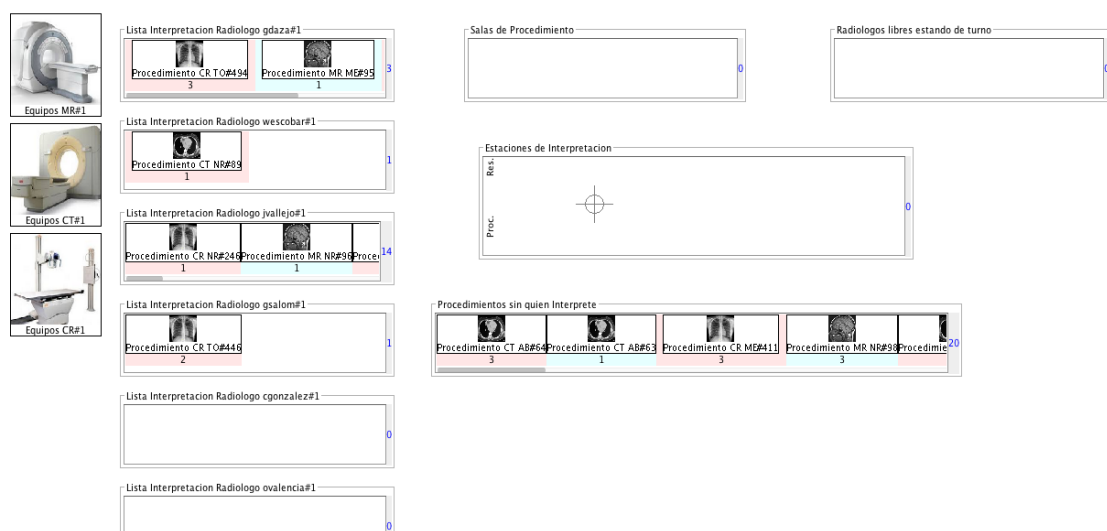


Figura 6.2: Estado final de las Colas en la Situación Alternativa

Cumplimiento	Incumplimiento	En el Sistema	Total
1145	18	24	1169
97.94 %	1.57 %	2.06 %	100 %

Tabla 6.16: Porcentaje de Cumplimiento en los niveles de servicio

Nivel Servicio	Incumplidos	Del total simulado
Urgentes	1.24 %	30 %
Prioritarios	0.33 %	10 %
Normales	0 %	60 %

Tabla 6.17: Porcentaje de Incumplimiento por niveles de servicio

al modelo (en cada experimento) en ambas situaciones.

Para comparar los promedios obtenidos en los resultados de la Situación Actual y la Alternativa, realizamos un test de Wilcoxon (implementado en R 4.3.2) sobre las poblaciones de promedios (50 experimentos), donde revisando su p-valor con un alfa menor a 0.05 nos dice que los promedios pertenecen a distribuciones diferentes.

En la tabla 6.18 se encuentran consolidadas las demoras (en horas) para realizar la interpretación de los procedimientos, luego observamos el porcentaje de mejora calculado para la Situación Alternativa.

Sub Especialidad	Mods-Prioridad	Actual	Alternativo	p-valor	Mejora
NR	CTMR-Urg	0.3701	0.3791	0.8954	% -2.42
NR	CTMR-Nor	0.6387	0.7595	0.1537	% -18.91
NR	CR-Nor	1.4891	0.6638	0.0246	% 55.42
NR	CR-Urg	1.2105	0.2987	0	% 75.32
ME	CTMR-Urg	0.4634	0.4336	0.7602	% 6.43
ME	CTMR-Nor	0.6007	0.5519	0.9557	% 8.12
ME	CR-Nor	1.5474	0.462	0	% 70.14
ME	CR-Urg	1.0966	0.291	0	% 73.46
TO	CTMR-Urg	0.3558	0.3291	0.927	% 7.49
TO	CTMR-Nor	0.3744	0.3017	0.7031	% 19.42
TO	CR-Nor	1.587	0.4204	0	% 73.51
TO	CR-Urg	1.146	0.2914	0	% 74.57
AB	CTMR-Urg	5.4627	4.4059	0.0193	% 19.35
AB	CTMR-Nor	14.079	5.1488	0	% 63.43
AB	CR-Nor	1.6533	4.4545	0	% -169.43
AB	CR-Urg	1.2621	3.9981	0	% -216.77

Tabla 6.18: Comparativa de promedios por Horas

De forma similar representamos en la tabla 6.19 la comparación de utilización de los Radiólogos durante sus diversos turnos durante el periodo de simulación, notando sus porcentajes de mejora. Cabe resaltar que los Radiólogos *cmoreno* y *hfernandez* no se utilizan en la Situación Alternativa.

Radiólogo	Actual	Alternativo	p-valor	Mejora
cgonzalez	% 72.34	% 24.63	0	% 47.71
cmoreno	% 68.92	% 0	0	% 0
gdaza	% 35.35	% 47.48	0	% -12.13
gsalom	% 72.29	% 45.56	0	% 26.73
hfernandez	% 75.09	% 0	0	% 0
jecheverri	% 53.78	% 27.57	0	% 26.21
jvallejo	% 45.18	% 52.33	0	% -7.15
ljimenez	% 46.14	% 37.54	0	% 8.6
ovalencia	% 70.52	% 51.32	0	% 19.2
wescobar	% 45.43	% 52.77	0	% -7.34

Tabla 6.19: Comparación de Utilización por Radiólogo

Luego de establecer los cálculos de mejora procedemos a realizar unas conclusiones que se extraen del análisis de los mismos, para posteriormente hacer unas recomendaciones finales y trabajos futuros.

En la Figura 6.3 se encuentran consolidadas las horas que transcurren para que el Radiólogo realice la interpretación del procedimiento según las políticas establecidas (secciones 5.2.4 y 5.2.4) en ambas situaciones.

Observando los resultados detallados en la tabla 6.18 y la tabla 6.19 extraemos las siguientes conclusiones:

- Se observan resultados de mejora en los tiempos de interpretación, siendo este indicador el principal objetivo del trabajo para mejorar.
- En cuanto al tiempo de interpretación de los procedimientos Rayos X (CR) de Abdomen (AB), vemos que ajustando los turnos se pueden mejorar aún más, hasta los mismos valores que en el resto de modalidades y sub-especialidades, ya que hay Radiólogos disponibles para hacerlo con esa sub-especialidad.

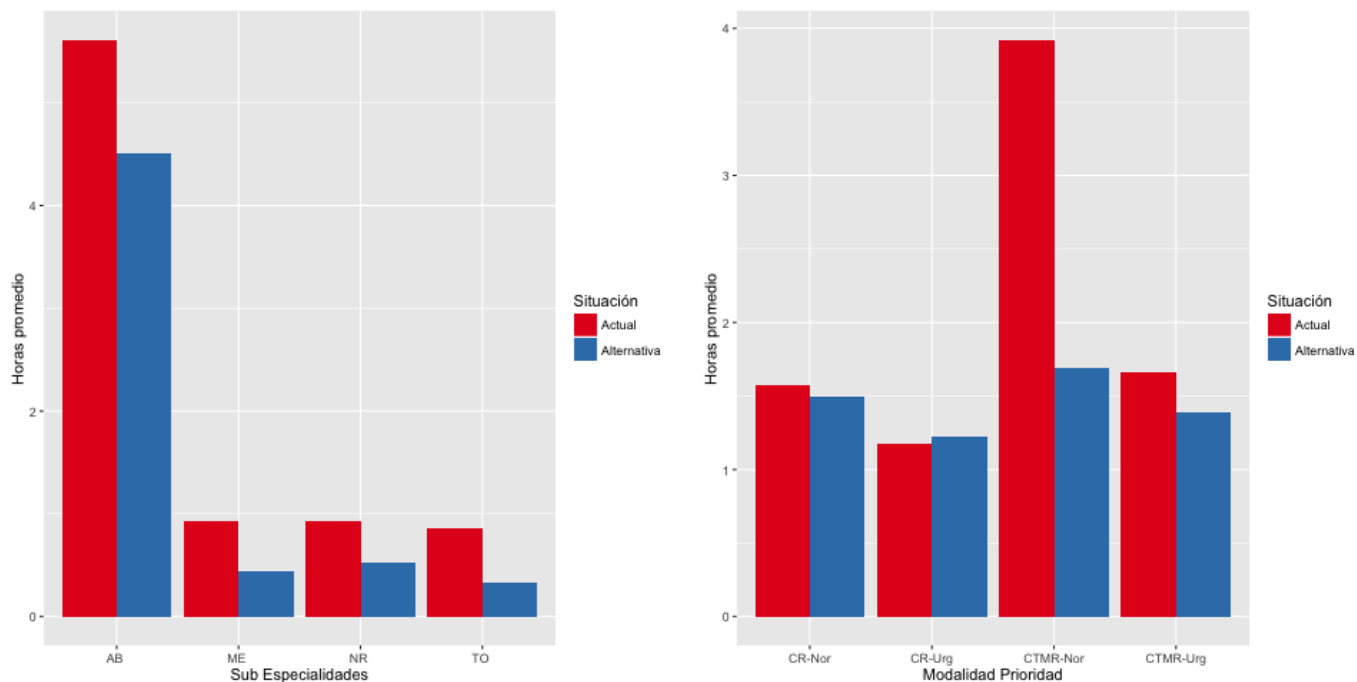


Figura 6.3: Tiempo promedio (Horas) para Interpretar Procedimientos

- Se mantuvieron en ambas situaciones los niveles de cumplimientos del servicio e incluso en el alternativo se interpretaron más procedimientos.
- En un orden secundario pero no menos importante, vemos que las utilizaciones de los Radiólogos (Tasa de Ocupación) descendieron y se nivelaron por debajo del 50 % en todo el staff (Figura 6.4).

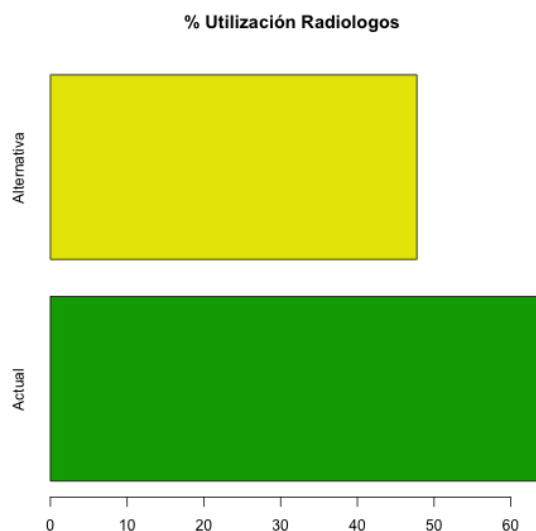


Figura 6.4: Nivel de utilización de Radiólogos en sus Turnos Interpretación

Finalmente, como dos Radiólogos quedaron libres en la Situación Alternativa se recomienda que dichos Radiólogos se dediquen a la realización de procedimientos de Fluroscopia y Ecografías (procedimientos con alta demanda en el Departamento). En caso de que las agendas queden comprometidas, se tiene el apoyo del staff de Radiólogos que están interpretando procedimientos.

Todas las conclusiones así como el desarrollo del trabajo esta consolidado en un informe de recomendaciones que se encuentra en el Anexo A, a modo de socializar los resultados del trabajo para que sean llevados a la práctica y sean medidos nuevamente para efectivizar su validez.

6.4. Retroalimentación con Usuarios

La retroalimentación con los usuarios se logró convocando a jornadas de presentación y revisión del informe de recomendación. El objetivo de las reuniones fue trabajar e impulsar en parte o totalmente las sugerencias planteadas en la Situación Alternativa, para evaluar factibilidad operativa, técnica y financiera.

Entre los usuarios se realizaron los siguientes aportes al trabajo antes de evaluar factibilidad:

- Se manifestó que la asignación de turnos impacta mucho en los resultados, por lo que solicitan se simulen varias semanas equiespaciadas dentro de un año, por ejemplo una semana cada cuatro meses.
- Se ajustaron sub-especialidades del staff radiológico.
- Se solicita realizar un análisis de sensibilidad respecto al procedimiento de “senos paranasales” que en el trabajo dispone sub-especialidad de Neuroradiología (NR) correctamente, pero en la realidad la interpretación de esos procedimientos la realiza el grupo de radiólogos de la sub-especialidad de Musculoesqueletico (ME).

Dentro de los aportes se trabajo en el punto de ajustar el Staff de Radiólogos, y se evidenciaron las mismas conclusiones.

También se simuló en otras semanas del año, donde encontramos que efectivamente se cambian los resultados notoriamente pero las tendencias de las recomendaciones se mantenían a favor de implementarlas.

En este capítulo final del trabajo comentamos los principales aportes de cada uno de los capítulos anteriores. También desarrollamos como fue la retroalimentación de los resultados con los usuarios, donde se realizaron valiosos aportes para potenciar su aplicabilidad en la Institución. Al cierre presentamos futuros trabajos.

En la recapitulación del trabajo destacamos de la Introducción del Capítulo 2, como encontramos oportunidades de mejora para realizar optimización en los procesos en el ámbito de salud. A su vez se describe el problema y objetivo específico del trabajo y como puede ser resuelto utilizando una metodología de SED.

En el Capítulo 3 desarrollamos el Estado del Arte donde describimos la vasta literatura y organizaciones que trabajan activamente en el campo de la optimización e investigación operativa aplicada a la salud, con foco particular en simulación. También explicamos conceptos importantes para dar contexto a nuestro trabajo, tales como Centros de Excelencia, sub-especialidades, modalidades y clasificación de procedimientos.

A posteriori, en el Capítulo 4 destacamos un panorama de herramientas para poder aplicar la metodología y que son usadas actualmente en el mercado o ámbitos académicos. También se describieron las justificaciones en la selección de nuestra principal herramienta de trabajo, la librería DESMO-J.

En el Capítulo 5 especificamos el modelo, implementamos el modelo computacional y efectuamos el desarrollo acerca de la recolección de los datos de entrada al mismo.

En el Capítulo 6, luego de realizar la verificación y validación al modelo mediante verificaciones de software, validaciones de traza y con usuarios, experimentamos con el modelo para proponer mejoras al proceso. Luego consolidamos los resultados del modelo comparando ambas situaciones (actual y alternativa) buscando alcanzar mejoras en la eficacia y eficiencia del sistema.

Nos parece importante presentarle al lector algunos comentarios y conclusiones generales obtenidas al realizar el proyecto:

Partiendo de un problema identificado y de una situación concreta en una Institución de Salud de alta complejidad, logramos modelar dicha situación construyendo el modelo, al utilizar simulación de eventos discretos con una biblioteca de software libre.

Mediante la visualización gráfica (sección 5.4.2) pudimos validar con los usuarios el funcionamiento del modelo. Se logró relevar información, generar parámetros de entrada, validar el sistema y obtener resultados valorados como muy buenos. Esto permitió a los usuarios una mejor comprensión de la realidad actual e identificar oportunidades de mejora.

Concluimos que los resultados de la Situación Alternativa proponen una mejora sustancial al negocio por

que liberan Radiólogos sin comprometer los niveles de servicio y mejoran los indicadores de tiempos de interpretación en los procedimientos y la tasa de utilización de los Radiólogos.

El sistema está abierto a uso futuro, incluyendo el estudio de más escenarios. Se comprobó que su nivel de flexibilidad es adecuado, ya que con los usuarios adaptamos el modelo rápidamente con pequeños cambios luego de conocidos sus resultados.

El esfuerzo computacional del modelo es reducido; se puede ejecutar en una computadora personal sin mayor inconveniente, así como evaluar y comparar sus resultados en la experimentación en cuestión de minutos.

El mayor reto del trabajo fue la falta de consenso en políticas de asignación de procedimientos entre los mismos Radiólogos, lo que dificultó en parte la definición de la situación actual a modelar y de las alternativas a evaluar.

Para alcanzar un adecuado desarrollo del trabajo aplicando la metodología planteada fue necesario contar con: acceso a la información real y a la participación del grupo de Radiólogos junto con el Jefe Administrativo.

Disponer de almacenes de datos con indicadores operativos sería lo ideal para desarrollar estas técnicas y poder medir el efecto de los cambios operativos que se decidan aplicar (a los procesos) a lo largo del tiempo. Lamentablemente no es común encontrarlas en las instituciones.

Es posible demostrar oportunidades de mejora en diversos procesos críticos de la operación en instituciones en salud. Dicha mejora de eficiencia y eficacia puede ser crucial para la supervivencia de las mismas en un mercado tan competitivo y demandado actualmente.

Los esfuerzos de mejora en los procesos dentro de las instituciones existen desde hace mucho tiempo e impulsan técnicas del campo de la investigación operativa para evidenciarlas. Este campo está en pleno desarrollo y es muy activo a nivel mundial. Prueba de ello son los congresos, artículos y organizaciones que se desarrollan o realizan en muchos países.

El interés de los usuarios se vio reflejado al recibir solicitudes para realizar un análisis de sensibilidad sobre situaciones como el ajustar la asignación de Fluoroscopia en todos los turnos de interpretación que se disponen o el revisar como impacta a los niveles de sub-utilización calculadas quitar un 3er Radiólogo a la situación actual.

También queda pendiente realizar el análisis de sensibilidad del procedimiento “senos paranasales” y evaluar el impacto del mismo en los resultados de productividad en los médicos. Entendemos que este escenario surge de objetivos diferentes, por lo que puede resultar en cambios en la especificación del modelo simulado, ya que la pregunta precisa de los Radiólogos era: Que pasaría si senos paranasales, sub-especialidad de Neuroradiología con un alto volumen, fuera interpretada por Radiólogos que no tuvieran esta sub-especialidad? Esta es una limitación del modelo actual pues busca que los procedimientos sean leídos de acuerdo a las sub-especialidades.

Este tipo de trabajos son de interés en los sistemas de información radiológicos (RIS), ya que disponen de módulos sobre toma de decisiones y despliegue de indicadores operativos, información que está siendo estandarizada a nivel mundial (bajo el perfil SOLE [SOL17] de la IHE).

Luego de avanzar en los trabajos futuros, se espera proseguir con una nueva retroalimentación con los usuarios para evaluar si es viable operativa, técnica y financieramente implementar parte de las recomendaciones en la Institución. Si se logrará esto, se planifica difundir los resultados de la experiencia completa del trabajo en congresos del área de la Investigación de Operaciones aplicada a la salud (como los que organizan regularmente INFORMS y EURO).

A.1. Antecedentes

En este apartado describimos la situaciones o eventos que dan origen al presente informe

El presente informe de recomendaciones se hace en marco de un trabajo académico que busca disminuir los tiempos de interpretación de los diversos procedimientos entre las sub-especialidades de la radiología diagnóstica.

A.2. Introducción

En este apartado describimos el problema o situación actual y revisar posibles cambios que se podrían probar para mejorar la situación

Actualmente estamos ante un aumento considerable en la cantidad de procedimientos solicitados al Departamento de Radiología producto de la nueva edificación del Centro Médico, donde se incorporan hasta el triple los niveles anteriores a este gran cambio.

Producto de la necesidad de procurar una mayor efectividad y control en los procesos, se implemento en la institución un sistema de información radiológico (RIS).

Con la aplicación del sistema se logró la automatización de una serie de indicadores que miden los tiempos operativos. Al disponer de dichos tiempos podemos realizar trabajos de investigación operativa los cuales constan de ciertas técnicas que pueden anticipar los impactos de los cambios que hacemos en los procesos, sin llevarlos a la realidad.

La técnica escogida se denomina Simulación de Eventos Discretos (SED) y fue usada para predecir cómo sería el impacto en los tiempos de interpretación de los procedimientos, si ajustáramos la forma de trabajar entre los Radiólogos en el día a día.

A.3. Simulación en Salud

En esta sección abordamos el tema de simulación en salud y un resumen de artículos para atraer al lector con otros casos de éxito

Actualmente en el campo de la investigación operativa aplicada a la salud se encuentra una amplia bibliografía, por ejemplo, en la serie de libros International Series in Operations Research & Management Science. Adicional a esto, las Instituciones de la Salud participan activamente en el ranking The healthcare Supply Chain Top 25 (Gartner) por sus logros en la materia.

Por ejemplo, en una Clínica de Chile mediante el uso extensivo de modelos de simulación sobre los procesos que involucran a los pacientes, se obtuvo una reducción del 35 % del tiempo de permanencia de los mismos en las instalaciones, así como también se destaca el aumento de la productividad de los equipos de diagnóstico hasta un 54 %.

En otro caso para Centro de Imagen mediante la simulación, se evalúa cual sería el impacto de la implementación de un PACS (Sistema de Almacenamiento y Distribución de Imágenes Médicas), dando como resultado mejora en la tasa de atención de pacientes en un 20 % y disminución en el tiempo de generación de informes en más de un 30 %.

También encontramos aportes para los Departamentos de Angiografía. Estos aportes muestran como una mejor secuenciación de los procedimientos permitiría al departamento: ahorrar hasta 432 minutos una vez por semana, mejorar la asignación de personal disponible y aumentar la utilización de la sala de procedimientos en un 16 %.

A.4. Especificación del modelo

En este apartado describimos la especificación del modelo, objetivo, supuestos, parámetros, variables de decisión, respuestas de salida

En la especificación del problema describimos el objeto de estudio, las abstracciones de la realidad, las respuestas que esperamos del modelo para solucionar el problema y las variables de decisión que puede manejar el negocio.

A.4.1. Objetivo

El objetivo es el estudio cuantitativo de los tiempos de interpretación y de cómo estos dependen de la organización del trabajo de los Radiólogos con vistas a una posible disminución de estos tiempos a través de la selección de las mejores políticas de trabajo.

Cabe aclarar que el tiempo de interpretación consiste en el tiempo que transcurre desde que un procedimiento finaliza hasta que las imágenes del mismo son interpretadas.

A.4.2. Parámetros de entrada

Los parámetros de entrada al modelo son los Radiólogos disponibles, tasas de arribo de procedimientos, período de simulación, aproximación de duraciones en cada modalidad.

Staff de Radiólogos

Id	Nombre	Sub-Especialidades	Grupo
0	gdaza	TO,ME	Musculo
1	wescobar	NR	Neuro
2	jvallejo	NR	Neuro
3	gsalom	TO,AB,CV,MA	Mama
4	cgonzalez	TO,AB,CV,MA	Mama
5	ovalencia	TO,AB,CV,MA	Mama
6	jerazo	TO,AB,CV,MA	Mama
7	hfernandez	TO,CV	Torax
8	cmoreno	TO	Torax
9	ljimenez	TO,ME	Musculo
10	jecheverri	TO,ME	Musculo

Tabla A.1: Staff de Radiólogos disponibles

Tasas de Arribo:

Mediante los tiempos operativos logramos estimar las tasas de arribo de los procedimientos para interpretar por horas del día hábil.

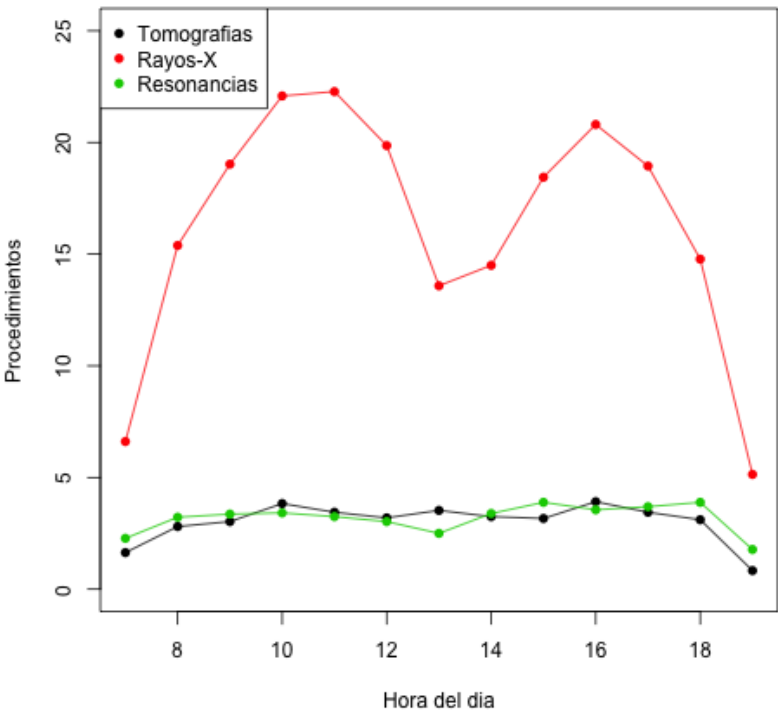


Figura A.1: Tasa de Procedimientos para Interpretación durante el día hábil

Aproximaciones de las duraciones:

Las aproximaciones de las duraciones fueron definidas por el Coordinador de Radiología según se muestra en la tabla A.2

Modalidad	Promedio	Desviacion Estandar
Tomografia	8	3
Resonancia	10	3
Rayos X	1	1
Rayos X - Torax	0.1	0

Tabla A.2: Duraciones (en minutos) de interpretaciones

Niveles de servicio: El tiempo de interpretación de un procedimiento de tipo normal es de 48 horas, tipos prioritarios cuatro horas y urgentes son dos horas.

Período de la simulación: El período se establece en cuatro días hábiles durante sus 24 horas, desde el día martes 14 de junio a las siete horas hasta las 23:00 horas del viernes 17 de junio, esto con el fin de evitar que perturbaciones afecten los resultados por días feriados y comportamientos del fin de semana.

A.5. Opciones estudiadas

En este apartado hacemos una descripción de varios escenarios analizados

Las opciones estudiadas fueron dos, la situación actual y luego se busco realizar un análisis de otra situación alternativa que la pueda mejorar.

A.5.1. Situación Actual

La situación actual se obtiene a partir los parámetros de entrada y la definición de una serie de supuestos para fijar las variables de decisión que reflejan la realidad mediante el modelo.

Supuestos

Tomando en cuenta las restricciones del modelo actual 5.2.2 especificamos los siguientes supuestos de la situación a modelar:

- En cada Turno que se cubre para interpretar la Modalidad CR (Rayos X) se realizan Procedimientos de Modalidad RF (Fluorosopia).
- Cuando el Radiólogo termina su turno, no se queda interpretando lo que tenga en la cola hasta su nuevo turno.
- La política de asignación de interpretaciones balancea la utilización de los Radiólogos.

- La Asignación de la Interpretación la hace el RIS en cuanto termina un procedimiento y no un Tecnólogo, por lo que no hay tiempos de espera mientras se realiza.

Variables de decisión

Actualmente la asignación de turnos no es exclusivamente para interpretar procedimientos (Resonancias y Tomografías). También se requiere de la lectura de Rayos X en todas las sub-especialidades y realizar procedimientos de Fluoroscopia.

Las definiciones de los turnos para la Situación Actual se encuentran resumidas en la siguiente tabla:

Radiólogo	# Turnos	Modalidades	Sub Especialidades	Horas Trabajadas
gdaza	4	CT,MR	TO,CV,MA,ME	24
wescobar	4	CT,MR	NR	24
jvallejo	4	CT,MR	NR	24
gsalom	1	CT,MR	TO,AB,CV,MA	6
gsalom	1	CR	ME,AB,NE,MA,TO	6
cgonzalez	1	CR	ME,AB,NE,MA,TO	6
ovalencia	1	CR	ME,AB,NE,MA,TO	6
hfernandez	2	CR	ME,AB,NE,MA,TO	12
cmoreno	1	CR	ME,AB,NE,MA,TO	6
ljimenez	1	CR	ME,AB,NE,MA,TO	6
ljimenez	3	CT,MR	TO,CV,MA,ME	18
jecheverri	1	CR	ME,AB,NE,MA,TO	6
jecheverri	1	CT,MR	TO,CV,MA,ME	6

Tabla A.3: Resumen de la Situación Actual

A.5.2. Situación Alternativa

A continuación se realiza una justificación de una propuesta para reflejar una nueva Situación Alternativa, con los mismos recursos, sin aumentar cargas de trabajo, buscando nuevos caminos que soporten decisiones basadas en un trabajo de investigación operativa.

Justificación

Luego de evaluar los resultados de la Situación Actual encontramos las siguientes evidencias:

- El porcentaje de incumplidos es bajo respecto al total de procedimientos simulados.
- Las Interpretaciones que están quedando demoradas son de Procedimientos de modalidad CR (observando la Figura 6.1, el largo de las colas en la tabla 6.10 y las horas promedio que se demoran en interpretar en la tabla 6.9).
- Se podrían mejorar los tiempos pues hay Radiólogos sub-utilizados y los que están mas cargados fueron los que cubrieron los de turnos de CR.

- Las sub-especialidades que más se demoran para interpretar son las de Abdómen (AB).

Analizadas las evidencias podemos proponer una Situación Alternativa, donde mantendremos los parámetros y respuestas de salida, con los siguientes ajustes en las variables de decisión:

- Quitar los turnos de interpretación exclusiva CR en todas las sub-especialidades y con realización de Fluroscopias.
- Agregar un turno de sub-especialidad de Abdómen (AB), con los mismos Radiólogos valencia y cgonzalez remplazando uno de los turnos de CR que son del mismo grupo según la tabla 6.3.
- Correr uno de los turnos de AB nuevos para cubrir una ausencia de dos días.
- Todos los turnos son de modalidades CR,CT,MR pero NO realizan Fluoroscopia.

La intención de la Situación Alternativa busca disminuir los tiempos de interpretación en todas las sub-especialidades y aumentar la utilización de los Radiólogos durante el turno.

Variables de decisión

Resumimos la definición de sus turnos, desde-hasta, Radiólogo, incluyendo modalidades y sub-especialidades cubiertas, manteniendo la carga horaria de la Situación Actual en la siguiente tabla:

Radiólogo	# Turnos	Modalidades	Sub Especialidades	Horas Trabajadas
gdaza	4	CT,MR,CR	TO,CV,MA,ME	24
wescobar	4	CT,MR,CR	NR	24
jvallejo	4	CT,MR,CR	NR	24
gsalom	2	CT,MR,CR	TO,AB,CV,MA	12
cgonzalez	1	CT,MR,CR	TO,AB,CV,MA	6
ovalencia	1	CT,MR,CR	TO,AB,CV,MA	6
ljimenez	4	CT,MR,CR	TO,CV,MA,ME	24
jecheverri	2	CT,MR,CR	TO,CV,MA,ME	12

Tabla A.4: Resumen de la Situación Alternativa

Un aspecto interesante es que quedan libres dos Radiólogos.

A.6. Resultados

En este apartado mostramos los resultados de la comparación consolidada y análisis de sensibilidad, se incluyen gráficos ilustrativos de los mismos

Se realizaron 50 experimentos replicando ambas situaciones y los resultados obtenidos muestran una diferencia significativa a favor de la Situación Alternativa.

En la tabla A.2 se encuentran consolidadas las horas que transcurren para que el Radiólogo realice la interpretación del procedimiento según las políticas 5.2.4 y 5.2.4 en ambas situaciones.

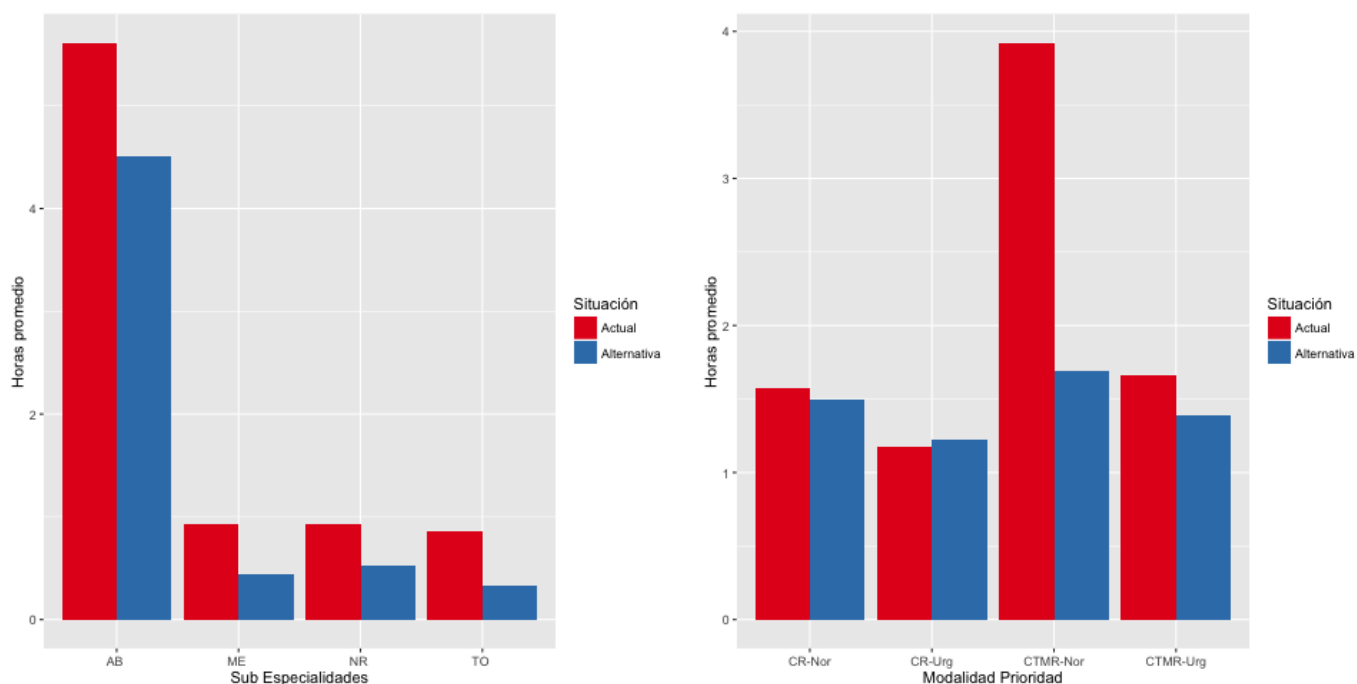


Figura A.2: Tiempo promedio (Horas) para Interpretar Procedimientos

Observando los resultados concluimos:

- Se observan resultados de mejora en los tiempos de interpretación, siendo este indicador el principal objetivo del trabajo para mejorar.
- En cuanto al tiempo de interpretación de los procedimientos Rayos X (CR) de Abdomen (AB), vemos que ajustando los turnos se pueden mejorar aún más, hasta los mismos valores que en el resto de modalidades y sub-especialidades, ya que hay Radiólogos disponibles para hacerlo con esa sub-especialidad.
- Se mantuvieron en ambas situaciones los niveles de cumplimientos del servicio e incluso en el alternativo se interpretaron más procedimientos.
- En un orden secundario pero no menos importante, vemos que las utilizaciones de los Radiólogos (Tasa de Ocupación) descendieron y se nivelaron por debajo del 50 % en todo el staff (Figura A.3).

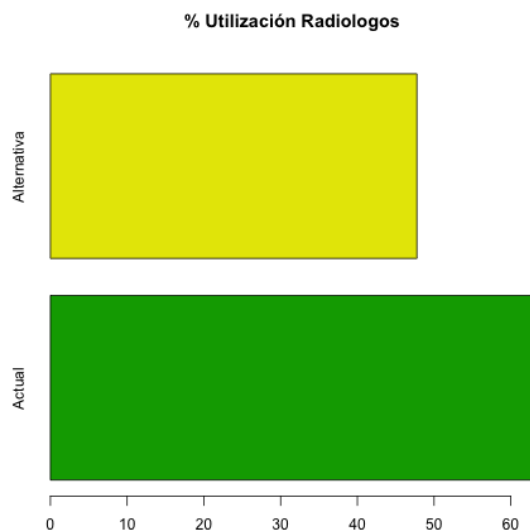


Figura A.3: Nivel de utilización de Radiólogos en sus Turnos Interpretación

A.6.1. Recomendaciones

En este apartado debemos explorar como viabilizar operativa, financiera y técnicamente un escenario que se acerque a la que mejor resultados brinda

Encontramos que como dos Radiólogos quedaron libres en la Situación Alternativa se recomienda que dichos Radiólogos se dediquen a la realización de procedimientos de Fluroscopia y Ecografías (procedimientos con alta demanda en el Departamento). En caso de que las agendas queden comprometidas, se tiene el apoyo del staff de Radiólogos que están interpretando procedimientos.

Este apéndice desarrolla una revisión de artículos que brindan resultados concretos sobre optimización de procesos en salud, a través de la implementación de simulación por eventos discretos SED.

Para cada artículo se incluye un breve resumen y qué aspectos son de interés para nuestro trabajo.

También se incluyen puntos de vista o consideraciones personales, por tener una experiencia acumulada de 16 años de trabajo en proyectos de informática en salud, particularmente en la implementación de RIS/PACS.

B.1. Departamentos de Angiografía

B.1.1. Un estudio de simulación en un Departamento de Angiografía

Del artículo titulado “A simulation study of the radiology department at JMH” [CAT⁺00] destacamos el siguiente resumen y algunas consideraciones.

Resumen:

Este artículo discute un estudio del Departamento de Angiografía en Jackson Memorial Hospital (USA). El modelo de simulación animado fue alimentado con datos reales.

Se identificaron varias ineficiencias y se exploraron seis escenarios para mejorarlas:

- Escenario 1: Sistema actual.
- Escenario 2: Modelar cada procedimiento para que se lleve a cabo con la ayuda de un solo tecnólogo.
- Escenario 3: Modelar cada procedimiento para que se lleve a cabo con la ayuda de dos tecnólogos.
- Escenario 4: Introducción de otra sala de procedimientos neurológicos.
- Escenario 5: Adición de un área de retención designada para el confort del paciente.
- Escenario 6: Extensión de un día en el horario de operación semanal.

Se identificó que en el Escenario 2 (un tecnólogo) el tiempo total en el sistema era significativamente más bajo que el sistema actual. Sin embargo, dio la tasa de utilización más baja para los ocho tecnólogos y para las salas de operaciones. Para aumentar la eficiencia, se hicieron otras recomendaciones.

Consideraciones:

Realiza simulación predictiva de cinco escenarios sobre el escenario actual. En particular, el cuarto de ellos muestra como puede impactar en los futuros planes de la institución colocar una nueva sala de procedimientos neurológicos.

La herramienta utilizada en el trabajo fue MedModel [Med16].

El trabajo supone que los procedimientos que se programan son los que se realizan. Sin embargo, en los Departamentos de Angiografía cuando un paciente ingresa para realizarse un procedimiento, muchas veces terminan haciéndole otros no programados (por ejemplo a causa de complicaciones clínicas).

B.1.2. La mejora en la programación mediante análisis y simulación de datos

Del artículo titulado “Enhancing the scheduling of interventional radiology department using data analysis and modeling and simulation” [GWK⁺08], destacamos el siguiente resumen y algunas consideraciones.

Resumen:

Este trabajo se centra en la mejora de las operaciones generales de un Departamento de Angiografía en un hospital comunitario (USA).

En la primera fase del proceso de mejora, se observaron retrasos significativos, que incluían el tiempo de espera de los pacientes en las salas de preparación, los retrasos en su llegada a las salas de procedimiento y el tiempo de espera de los especialistas. Un análisis exhaustivo de los retrasos llevó a la segunda fase de mejora, en la que se evaluó la metodología de planificación de casos. A través de un enfoque de diseño de experimentos, se determinó que la edad del paciente y quien sea el especialista no tienen impactos significativos en el tiempo del procedimiento. Se creó un modelo de simulación de eventos discretos para replicar una línea de base del sistema actual, en el que se identificó y evaluó un nuevo modelo de programación, que incorpora bloques de tiempo de procedimiento.

En general, los resultados mostraron que: una mejor secuenciación de los casos permitiría al Departamento ahorrar hasta 432 minutos una vez por semana, mejorar la asignación de personal disponible aumentaría la utilización de la sala de procedimientos en un 16 % y el rendimiento al 11 %.

Consideraciones:

La herramienta utilizada en el trabajo fue Arena 10 [Are16].

B.2. En Departamentos de Radiología

B.2.1. Simulación para mejorar tiempos de espera en los pacientes

Del artículo titulado “A simulator to improve waiting times at a Medical Imaging Center” [RBB⁺08] destacamos el siguiente resumen y algunas consideraciones.

Resumen:

Este trabajo muestra un entorno de simulación gráfica para facilitar el desarrollo de estudios de simulación en Departamentos de Radiología.

La simulación se realizó desde una visión general en cuanto al como funciona un Departamento de Radiología, agrupando por modalidad y horario la tasa de arribos.

Todos los datos son proporcionados al simulador a través de una interfaz gráfica de usuario (GUI). Se proporciona un ejemplo en el que se utiliza el simulador para mejorar los tiempos de espera y la tasa de utilización de los equipos de imagen en un hospital de investigación en Chile.

El trabajo tiene la fortaleza de evaluar conveniencias a la hora de seleccionar tecnología para adquisición de imagen, o para cambios operativos con el personal de técnicos radiológicos como personal de enfermería y administrativos y ver el impacto para la espera de los pacientes en adquirir sus imágenes correctamente.

Dentro de los aportes encontramos una reducción del 35 % del tiempo de permanencia de los pacientes en las instalaciones. También se destaca el aumento de la productividad hasta un 54 % del centro de imagen.

Consideraciones:

La herramienta utilizada en el trabajo fue Flexsim GP [Fle16].

Se destaca la posibilidad al momento de crear las entidades indicar sus respectivos atributos especializados, por ejemplo una sala de rayos X con atributos, de modalidad CR (radiología computada) ó DR (radiología directa), así como la cantidad de vestidores que dispone.

Sin embargo, no define como cooperan dichos recursos (salas y vestidores) entre entidades. Este aspecto sería el objeto de un trabajo completo adicional, porque frecuentemente es un cuello de botella en el proceso cuando se adquieren tecnologías DR. Las salas de modalidad DR permiten una utilización de hasta tres veces más lo que hace una sala con modalidad CR, siempre y cuando dispongan de más vestidores.

Marca las distancias entre las entidades y recursos, para los tiempos de desplazamiento.

Propone varios escenarios cuando llegan los pacientes, ya que el trabajo busca minimizar el tiempo que le lleva al paciente ambulatorio estar en las instalaciones. Sin embargo, la simulación no toma en cuenta el impacto de los procedimientos que deben hacerse a los pacientes de emergencias, hospitalizados en sus 550 camas. Dichos pacientes afectan en gran manera la operativa diaria en centros hospitalarios. Deberían ser incluidos

escenarios para ver si vale la pena o no dejar recursos exclusivos para dichos pacientes.

Los pacientes hospitalizados pueden venir en camillas y requerir tiempos diferentes para sus desplazamientos, como en la preparación de los procedimientos la variabilidad en las duraciones de las preparaciones previas (para realizar los procedimientos) es muy alta y pueden sesgar los resultados de las SED.

B.2.2. Estudio en el flujo en el área de Tomografía

Del artículo titulado “A study of the CT scan area of a healthcare provider” [RND⁺04], destacamos el siguiente resumen y alguna consideraciones.

Resumen:

Realiza un análisis de los procesos actuales y como quedarían los flujos de atención en el nuevo proceso con la implementación de un PACS en el departamento.

Se encontró que el rendimiento del paciente se incrementaría en un 20 % y el tiempo de generación de informes disminuiría en más de un 30 % con la implementación del sistema de archivo de imágenes digitales.

Consideraciones:

La herramienta utilizada en el trabajo fue Arena 7 [Are16].

El artículo comenta la importancia de los tipos de pacientes (ambulatorios y hospitalizados) y como deben disponer flujos diferentes. Los escenarios que modela son muy útiles. Por ejemplo evalúa el impacto en la utilización de un segundo tomógrafo ó en incrementar un Radiólogo, respecto al tiempo de espera de los pacientes ambulatorios.

B.2.3. Atención de pacientes para Radiología General

Del artículo titulado “Optimisation-Based on Simulation: A Diagnostic Imaging Department Case-Study” [GMJ⁺10], destacamos el siguiente resumen y alguna consideraciones.

Resumen:

Este artículo presenta un estudio de caso de un análisis de flujo de trabajo de radiología convencional en un proveedor de atención médica portugués. Se aplicaron herramientas de modelado para definir el flujo de trabajo existente.

Los flujos de trabajo se analizaron en una herramienta de simulación. La integración de herramientas de modelado y simulación permitió identificar los cuellos de botella del sistema. Este estudio se enfoca en un Departa-

mento de Imagenología y se traduce en la identificación de un nuevo flujo de trabajo que permite la reducción relativa del tiempo total de terminación en el 41 %.

Consideraciones:

El trabajo dispone un diagrama del proceso de atención claro, que permite entender las tareas involucradas para adquirir imágenes de CR, y ser útil para un trabajo de inclusión de tecnología como la DR.

Además tiene una metodología interesante sobre como modelar el problema y eventualmente realizar programación lineal. Sin embargo, los escenarios son pocos para revisar la validación de una SED, no muestra claramente las tareas que son los cuellos de botella y asume pacientes ambulatorios 100 %.

En este Anexo se explica como se distribuye el código para la implementación del modelo computacional, así como el código usado en la recolección, manipulación de datos. Además se describen los archivos de salidas y se dan algunos comentarios sobre los de test de cubrimiento de código.

C.1. Distribución de Paquetes

En el proyecto usamos dos lenguajes de programación: Java para la implementación del modelo computacional y R para realizar tareas en la recolección de datos, manipulación del mismo y generar gráficos para el informe de recomendaciones.

El código se distribuye según se observa en la Figura C.1 de la siguiente manera:

En el directorio **src** se dispone el código Java con la destrucción de paquetes, los cuales describimos y comentamos a continuación.

En el paquete de **pruebas** se encuentran pruebas unitarias al modelo computacional para apoyar tareas de debug. También tiene unas pruebas de concepto para la integración con el código R mediante el conector “jri”. La integración no se realiza porque el esfuerzo es muy grande en relación al beneficio, ya que se necesitaba disponer el código R definitivo para realizar una migración de código hacia el conector, a causa de que R y Java usan estructuras de datos (datatypes, entre otros).

El paquete de **ris.dss.interpretaciones** contiene el modelo computacional. En **ris.dss.interpretaciones.entidades** y **ris.dss.interpretaciones.eventos** se encuentran las entidades y los eventos del mismo respectivamente. La clase principal del modelo es “AsignacionInterpretacionGUI.java”, para ejecutar el modelo con interfase gráfica se invoca la clase “Simulacion.java”.

El paquete de **ris.dss.interpretaciones.politicas** contiene las políticas que utiliza el modelo. Se encuentran integradas al modelo con interfaces y se pueden implementar nuevas políticas, modificando las clases “GeneradorProcedimientos.java” y “AsignacionInterpretacionGUI.java” mediante un ajuste el nombre de la clase invocada.

El paquete de **ris.dss.interpretaciones.test** contiene los test de cubrimiento de códigos en la clase “RadiologosTest.java”. La clase “ExperimentacionTest.java” contiene el proceso de experimentación automatizado realizado para cada escenario.

El modelo de datos para cada experimento lo encontramos en el directorio “model-data”.

En el directorio **R** contiene los siguientes códigos en R: “tasas.R”, para la aproximación de las tasas de arribo con los datos de entrada, “analisisResultados.R” consolida la información para analizarlos, “comparacionRes” compara los resultados consolidados de ambos escenarios, finalmente “graficos.R” implementa la generación de gráficos para el informe de recomendaciones.

El directorio **lib** contiene las librerías usadas por DESMO-J para este proyecto, “data20110225.jar” es usada para la integración con el modelo de datos, y el resto son usadas para la integración de las interfaces gráficas en 2D.

Las dependencias de los diversos paquetes involucrados en la implementación de la simulación se muestran en la Figura C.1

C.2. Archivos de Salida

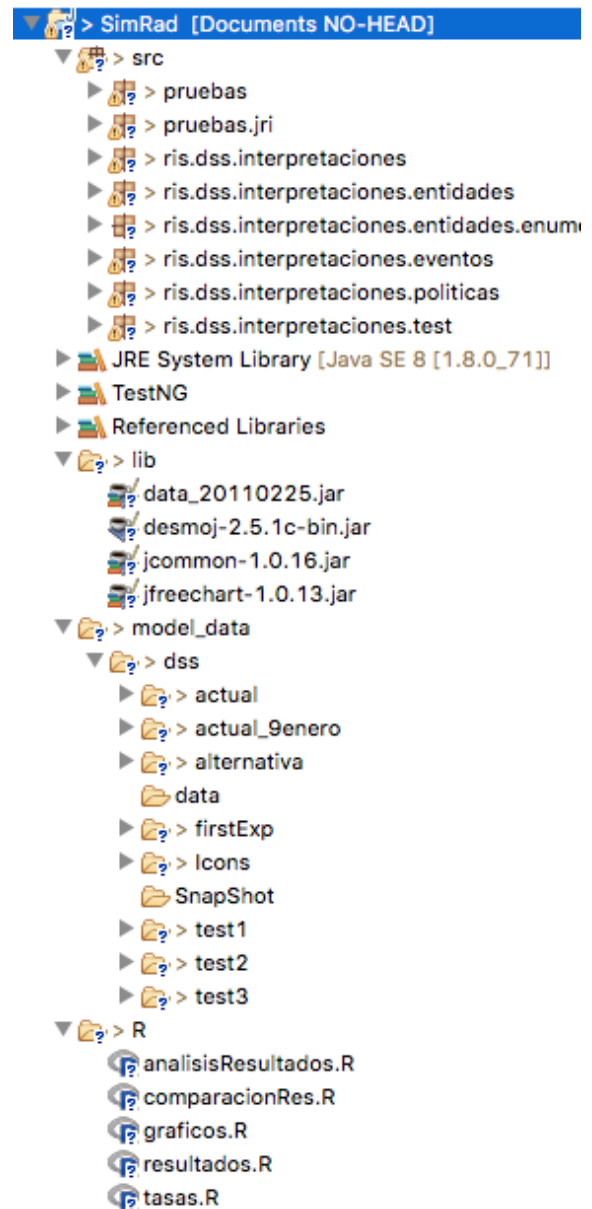
En esta sección se describe brevemente el contenido de los archivos de salida generados por el modelo computacional (Figura C.2).

En la carpeta **output** de cada experimento, se encuentra una serie de archivos, algunos son generados por la librería directamente y otros son generados de forma personalizada para poder evaluar los datos con el código en R.

El archivo **dss-error**, contiene un reporte de los errores que se encuentran en el modelo computacional. Luego en el archivo **dss-report** encontramos el reporte de todos los objetos estadísticos (histogramas, contadores, etc) para evaluar los resultados de la simulación.

El archivo dss-trace contiene la traza con la ejecución de la simulación, además contiene las “marcas” usadas por los test de cubrimiento de código.

Finalmente, los archivos con el prefijo “dss-respuestas” contienen las respuestas de un solo experimento. Luego se encuentra un juego de archivos con el prefijo “actual” donde consolidamos las salidas generadas en todos los “runs” asociando cada semilla usada en el experimento.



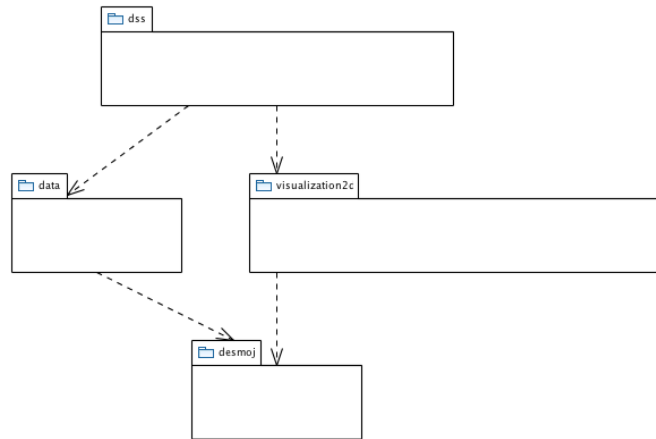


Figura C.1: Dependencias entre paquetes

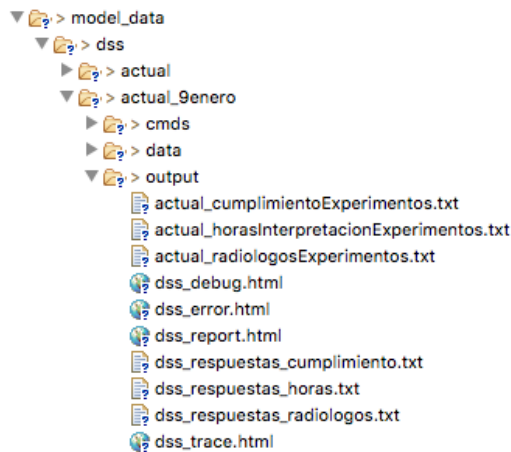


Figura C.2: Archivos de Salida

C.3. Test de Cubrimientos de Código

En esta sección se comenta el funcionamiento de los tests de cubrimiento de código para los eventos de ciertas entidades que se implementan con un árbol de decisión de varios niveles.

La idea es utilizar la traza como un archivo que contenga una marca de cuando se ejecuta el código de una hoja del árbol de decisión, ya que podemos disponer el contexto del como fue que se ejecutó el evento durante la simulación.

La ventaja principal es poder interrelacionar cadenas de eventos entre diferentes entidades para asegurar la validez del modelo computacional.

Este enfoque fue muy beneficioso durante el desarrollo del mismo. Además son un tipo de pruebas retroactivas, ya que cuando se ajusta el modelo (en aspectos que no afectan los comportamientos de los eventos) se pueden reproducir los tests fácilmente para asegurar que todo siga funcionando como se espera. También en casos de que se introducen “bugs” ellos se detectan tempranamente gracias a este tipo de pruebas.

El funcionamiento se comporta inicialmente generando mensajes de marca a la traza en el instante que se ejecuta el código (“nombreEvento-numeroMarca”), para luego con un test de software (testNG) consultar en la traza las marcas que se encuentren en la misma. Se dispone un test por cada evento (“complejo”), y resulta

exitoso cuando se encuentran todas las marcas esperadas en el evento.

En la Figura C.3 muestra como es el resultado de los test una vez que son ejecutados.

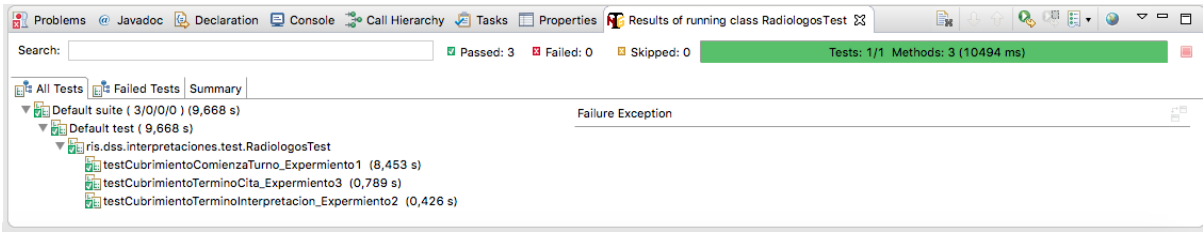


Figura C.3: Resultados de los Test

Índice de figuras

2.1. Centro Médico Imbanaco - Nueva Edificación	5
2.2. Proceso de la simulación	7
2.3. Metodología del trabajo	8
4.1. Entorno para diagramar en UML	25
4.2. Entorno para documentar en Latex	25
5.1. Modelo Conceptual	27
5.2. Diagrama de estados de la entidad Radiólogo	30
5.3. Diagrama del flujo principal de la simulación	31
5.4. Diagrama de actividades Evento - Terminar Cita	34
5.5. Diagrama de actividades Evento - Terminar Interpretación	34
5.6. Diagrama de actividades Evento - Terminar Turno	35
5.7. Diagrama de actividades del Radiólogo	35
5.8. Diagrama de actividades Evento - Comienza Cita	36
5.9. Diagrama de actividades Evento - Comienza Interpretación	36
5.10. Diagrama de actividades Evento - Comienza Turno	37
5.11. Diagrama de actividades Evento - Generador Procedimientos	37
5.12. Diagrama de actividades Evento - Generador Citas	38
5.13. Diagrama de actividades Evento - Chequeo Lista de Interpretación	38
5.14. Tasa de Procedimientos para Interpretación durante el día hábil	40
5.15. Diagrama de Clases de Diseño	43
5.16. Clases e Interfaces sobre Políticas	44
5.17. Archivo con los datos de entrada	44
5.18. Esquema para validar archivos de entrada	45
5.19. Transcurso de la simulación	45
5.20. Radiólogo realizando un Procedimiento	46
6.1. Estado final de las Colas en la Situación Actual	57
6.2. Estado final de las Colas en la Situación Alternativa	60
6.3. Tiempo promedio (Horas) para Interpretar Procedimientos	62
6.4. Nivel de utilización de Radiólogos en sus Turnos Interpretación	62
A.1. Tasa de Procedimientos para Interpretación durante el día hábil	68
A.2. Tiempo promedio (Horas) para Interpretar Procedimientos	72
A.3. Nivel de utilización de Radiólogos en sus Turnos Interpretación	73
C.1. Dependencias entre paquetes	81
C.2. Archivos de Salida	81
C.3. Resultados de los Test	82

Glosario

ACR Colegio Americano de Radiología. 5, 17

CR Radiografía Computada. 15, 16, 76

CT Tomografía Computada o Escanografía. 15, 16, 17

CUPS Clasificación Única de Procedimientos en Salud. 17, 18

DR Radiografía Directa. 76

DSS Sistemas de soporte a la decisión. 17

DX Radiografía Directa. 16

HTML5 HTML5 (HyperText Markup Language, versión 5) es la quinta revisión importante del lenguaje básico de la World Wide Web, HTML.. 45

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers - Una asociación mundial de ingenieros dedicada a la estandarización y el desarrollo en áreas técnicas.. 13

INFORMS The Institute for Operations Research and the Management Sciences - Es la sociedad más grande en el mundo para los profesionales en el campo de la investigación de operaciones (I.O.), ciencias de la administración y la analítica.. 13

Latex Es un sistema de composición de textos, orientado a la creación de documentos escritos que presenten una alta calidad tipográfica. 25

MG Mamografía Digital. 16

MR Resonancia Magnética. 15, 16, 17

NM Medicina Nuclear. 15

PACS Sistema de Archivo y Comunicación de Imágenes médicas. 14, 67, 74, 77

RIS Sistema de información Radiológica. 5, 15, 18, 44, 74

SED Simulación bajo eventos discretos. 5, 13, 19, 20, 26, 74

Timebeat Granularidad de tiempo de simulación. 39

US Ultrasonido. 15, 16, 17

Bibliografía

- [Are16] Arena - simulation software [online]. 2016. URL: <https://www.arenasimulation.com/> [cited 2015-07-09].
- [BP05] Wolfgang Kreutzer Bernd Page. *The Java Simulation Handbook - Simulating Discrete Event Systems with UML and Java*. Shaker Verlag, 2005. URL: <http://desmoj.sourceforge.net/simbook.html>.
- [CA09] James R. Wilson Christos Alexopoulos, David Goldsman. *Advancing the Frontiers of Simulation*. Springer US, 2009. URL: <http://link.springer.com/book/10.1007%2Fb110059>.
- [CAT⁺00] M. A. Centeno, C. Albacete, D. O. Terzano, M. Carrillo, and T. Ogazon. A simulation study of the radiology department at jmh. In *Simulation Conference, 2000. Proceedings. Winter*, volume 2, pages 1978–1984 vol.2, 2000. doi:10.1109/WSC.2000.899195.
- [Cat15] Codigos únicos de procedimiento [online]. 2015. URL: <https://www.minsalud.gov.co/Paginas/MinSalud-expide-nueva-clasificacion-de-procedimientos-en.aspx> [cited 2016-04-09].
- [Cat16] Catalogo de procedimientos [online]. 2016. URL: <http://www.acr.org/~media/ACR/Documents/AppCriteria/StandardProcedureListACDiagnosticTopics.xlsx> [cited 2016-04-09].
- [CIE16] Cie 10 en la wiki [online]. 2016. URL: <https://es.wikipedia.org/wiki/CIE-10> [cited 2016-04-09].
- [DD86] R Davies and T Davies. Using simulation to plan health service resources: Discussion paper. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 79(3):154–157, mar 1986. URL: <https://doi.org/10.1177%2F014107688607900308>, doi:10.1177/014107688607900308.
- [def15a] Professions in diagnostic radiology [online]. 2015. URL: <http://www.radiologyinfo.org/en/info.cfm?pg=professions-diagnostic-radiology/> [cited 2015-07-09].
- [def15b] Professions in diagnostic radiology [online]. 2015. URL: <http://www.radiologyinfo.org/sp/submenu.cfm?pg=test-treatment/> [cited 2015-07-09].
- [DES15] Desmo-j basic features [online]. 2015. URL: http://desmoj.sourceforge.net/basic_features.html [cited 2016-04-09].

- [DSS16] Appropriateness-criteria [online]. 2016. URL: <http://www.acr.org/Quality-Safety/Appropriateness-Criteria> [cited 2016-04-09].
- [ecl15] Eclipse mars [online]. 2015. URL: <https://eclipse.org/mars/> [cited 2016-04-09].
- [Exp16] Expertfit - distribution fitting software [online]. 2016. URL: <http://www.averill-law.com/distribution-fitting/> [cited 2016-04-12].
- [Fle16] Flexsim healthcare [online]. 2016. URL: <https://healthcare.flexsim.com/> [cited 2015-07-09].
- [Gar15] The healthcare supply chain top 25 [online]. 2015. URL: <https://www.gartner.com/doc/3169736?plc=ddc> [cited 2016-04-09].
- [GMJ⁺10] C. Granja, J. Mendes, F. Janela, J. Soares, and A. Mendes. Optimisation-based on simulation: A diagnostic imaging department case-study. In *Information, Process, and Knowledge Management, 2010. eKNOW '10. Second International Conference on*, pages 32–36, Feb 2010. doi:10.1109/eKNOW.2010.26.
- [GWK⁺08] B. Gopakumar, S. Wang, M. T. Khasawneh, K. Srihari, J. Hensberry, and D. Cummings. Enhancing the scheduling of interventional radiology department using data analysis and modeling and simulation. In *2008 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, pages 1428–1432, Dec 2008. doi:10.1109/IEEM.2008.4738106.
- [inf14] Healthcare 2015 [online]. 2014. URL: <http://meetings2.informs.org/wordpress/healthcare2015/> [cited 2016-04-09].
- [Inf15] Simulation software survey, edition october 2015 [online]. 2015. URL: <http://www.orms-today.org/surveys/Simulation/Simulation.html> [cited 2016-04-09].
- [Jaa16] JaamSim Development Team. Jaamsim: Discrete-event simulation software [online]. 2016. Version 2016-14. URL: <http://jaamsim.com>, doi:10.5281/zenodo.57118.
- [KWM14] MD Kevin W. McEnery. *Coordinating Patient Care Within Radiology and Across the Enterprise*. American College of Radiology, 2014. URL: <http://informatics.jacr.org/sites/default/files/5.13-2837.pdf> [cited 2016 Marzo 26].
- [Med16] Medmodel - better decisions faster [online]. 2016. URL: <https://www.promodel.com/products/medmodel> [cited 2015-07-09].
- [mod16] Modificadores de procedimientos [online]. 2016. URL: <http://www.acr.org/~media/ACR/Documents/AppCriteria/ProcedureInfo.pdf> [cited 2016-04-09].
- [Opt11] Optquest engine [online]. 2011. URL: <http://www.opttek.com/OptQuest> [cited 2016-04-12].
- [pap16] Papyrus modeling environment [online]. 2016. URL: <https://eclipse.org/papyrus/> [cited 2016-07-23].
- [Pto14] The ptolemy project [online]. 2014. URL: <http://ptolemy.eecs.berkeley.edu/ptolemyII/index.htm> [cited 2016-04-09].

- [r16] The r project for statistical computing [online]. 2016. URL: <https://www.r-project.org/> [cited 2016-04-09].
- [RBB⁺08] F. J. Ramis, F. Baesler, E. Berho, L. Neriz, and J. A. Sepulveda. A simulator to improve waiting times at a medical imaging center. In *2008 Winter Simulation Conference*, pages 1572–1577, Dec 2008. doi:10.1109/WSC.2008.4736239.
- [RND⁺04] S. Ramakrishnan, K. Nagarkar, M. DeGennaro, M. Srihari, A. K. Courtney, and F. Emick. A study of the ct scan area of a healthcare provider. In *Simulation Conference, 2004. Proceedings of the 2004 Winter*, volume 2, pages 2025–2031 vol.2, Dec 2004. doi:10.1109/WSC.2004.1371565.
- [ser16] International series in operations research management science [online]. 2016. URL: <http://www.springer.com/series/6161> [cited 2016-12-08].
- [Sim15] Simrunner [online]. 2015. URL: <https://www.promodel.com/products/simrunner/> [cited 2016-04-12].
- [Sim16] Simul8 - process simulation software [online]. 2016. URL: <https://www.simul8.com/> [cited 2015-07-09].
- [SOL17] Standardized operational log of events (sole) [online]. 2017. URL: [http://wiki.ihe.net/index.php/Standardized_Operational_Log_of_Events_\(SOLE\)](http://wiki.ihe.net/index.php/Standardized_Operational_Log_of_Events_(SOLE)) [cited 2017-02-12].
- [Sta15] Stat::fit® version 3 - distribution fitting software [online]. 2015. URL: <http://www.geerms.com/Fitting-Distributions.html> [cited 2016-04-12].
- [tes16] Testng - testing framework [online]. 2016. URL: <http://testng.org> [cited 2016-10-19].
- [tex16] Texlipse is a plugin that adds latex support to the eclipse ide [online]. 2016. URL: <http://texlipse.sourceforge.net/> [cited 2016-04-09].
- [Wat16] Watson en la wiki [online]. 2016. URL: https://es.wikipedia.org/wiki/Watson_%28inteligencia_artificial%29 [cited 2016-04-09].
- [wik16] List of discrete event simulation software [online]. 2016. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_discrete_event_simulation_software [cited 2016-04-09].