



Optimización del proceso de adquisición de imágenes diagnósticas de rayos X para clientes de la empresa Radiología Digital S.A.S. basada en redes de Petri

Erika Alejandra Jiménez Medina

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Electrónica, Biomédica y Mecatrónica
Programa de Ingeniería Biomédica
Bogotá, Colombia
2020

Optimización del proceso de adquisición de imágenes diagnósticas de rayos X para clientes de la empresa Radiología Digital S.A.S. basada en redes de Petri

Erika Alejandra Jiménez Medina

Trabajo de investigación presentado como requisito para optar al título de:
Ingeniera Biomédica

Director:
Ing. Mario Enrique Duarte González PhD

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Electrónica, Biomédica y Mecatrónica
Programa de Ingeniería Biomédica
Bogotá, Colombia
2020

Nota de Aceptación

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado 1

Firma del Jurado 2

Bogotá D.C. _____

A mi Familia.

“Porque todo necesita energía -recitó ella obedientemente, con los ojos fijos en su mano-. Tenemos que ponerle esfuerzo y energía a cualquier cosa que deseamos cambiar”.

Erin Morgenstern.

Agradecimientos

El presente trabajo de grado marca la culminación de una etapa que da lugar a nuevos retos y oportunidades en mi vida, esto no habría sido posible sin el acompañamiento personal y académico de muchas personas que me han brindado su apoyo a lo largo de este proceso.

En primer lugar, agradezco a mi padre y madre quienes antes y durante este proyecto académico e investigativo han creído en mí y me han brindado amparo, valores, amor, ejemplo y todas las herramientas posibles para llevar a cabo este proceso crucial en mi vida. A mis hermanos y demás familiares que han sido más que espectadores y que durante todas las fases de mi vida han estado pendientes de mí y de cada uno de mis proyectos, su apoyo incondicional me ha llevado a dar lo mejor de mí siempre.

A la empresa Radiología S.A.S. por brindarme todas las herramientas, conocimientos y apoyo en este primer paso para ejercer mi profesión y culminar con éxito mi formación académica. Gracias a la Ingeniera Victoria Rincón por su constante seguimiento durante la realización de esta tesis, sus sugerencias, conocimientos y guía incondicional fueron claves durante este proceso tan significativo para mi profesión, me siento afortunada de haber tenido como tutora a una persona tan excepcional, dedicada y comprometida con su rol de guía.

A mi tutor el Ingeniero Mario Duarte por poner su confianza en mí desde el principio, y que a pesar de las adversidades que se presentaron siempre mantuvo un optimismo intachable.

No podría incluir a todas las personas que me han ayudado y han estado conmigo a lo largo de mi formación profesional, profesores, amigos y compañeros a quienes pronto llamaré colegas, han sido imprescindibles en este largo camino.

Resumen

Radiología Digital S.A.S. es una Institución Prestadora de Servicios de Salud (IPS) nacional que está habilitada como prestador de referencia en telerradiología. El cómputo de los indicadores de oportunidad han permitido evidenciar retrasos significativos en la etapa de toma de imágenes radiológicas, que además de entorpecer los procesos de la institución, generar efectos negativos en costos y afectar su objetivo misional, tienen repercusiones directamente al paciente. Los retrocesos en el proceso de adquisición de imágenes radiológicas, expone, en algunos casos, nuevamente al paciente a la radiación ionizante, extiende los tiempos de oportunidad, afecta la resolutivead, entre otros.

En este trabajo de grado se realizó la optimización del proceso de toma de los rayos X para la modalidad más solicitada para lectura e interpretación en un cliente prestador remitidor de la empresa Radiología Digital S.A.S. Se realizó la simulación del proceso de adquisición de imágenes usando redes de Petri y se obtuvo la información de los procesos mediante instrumentos de recolección de información y reuniones.

Para la optimización se utilizó la herramienta Petri Net Toolbox de MATLAB con ésta se modeló y simuló el proceso actual de adquisición de la imagen de rayos X de la IPS seleccionada, en este se generaron cambios en la estructura que permitieron presentar tres posibles optimizaciones. La optimización que generó un mayor impacto fue la base de un documento con sugerencias dirigido al cliente remitidor que permitiera mejorar el proceso de adquisición de imágenes diagnósticas y por ende impactar los tiempos de entrega del informe radiológico.

Palabras clave: Redes de Petri, Telerradiología, Indicadores de oportunidad, Gestión de la tecnología biomédica.

Abstract

Radiología Digital S.A.S. is a national Health Services Provider Institution (HSPI) that is qualified as a reference provider in teleradiology. The computation of the indicators of opportunity have revealed significant delays in the radiological imaging stage, which in addition to hindering the institution's processes, generating negative cost effects and affecting its mission objective, have repercussions directly for the patient. The setbacks in the process of acquiring radiological images, exposes, in some cases, the patient again to ionizing radiation, extends the opportunity times, affects the resolution, among others.

In this degree project, the optimization of the X-ray taking process for the most requested modality for reading and interpretation was carried out in a referring client of the company Radiología Digital S.A.S. The simulation of the image acquisition process was performed using Petri nets and information on the processes was obtained using information gathering instruments and meetings.

For optimization, the MATLAB Petri Net Toolbox was used, with which the current process of acquiring the X-ray image of the selected IPS was modeled and simulated, in which changes in the structure were generated that allowed presenting three possible optimizations. The optimization that generated the greatest impact was the basis of a document with suggestions addressed to the referring client that would improve the process of acquiring diagnostic images and therefore impact the delivery times of the radiological report.

Key words: Petri nets, Teleradiology, Indicators opportunity, Biomedical technology management.

Tabla de Contenidos

Agradecimientos	IX
Resumen	XI
Abstract	XIII
Lista de Tablas	XV
Lista de Figuras	XV
1 Introducción	1
1.1 Estado del arte	3
1.2 Planteamiento del problema	6
1.3 Justificación	7
1.4 Objetivos	9
1.4.1 Objetivo General	9
1.4.2 Objetivos Específicos	9
1.5 Alcance	9
1.6 Organización del documento	10
2 Marco teórico	11
2.1 ¿Qué son rayos X?	11
2.1.1 Riesgos asociados a la toma de rayos X convencional	12
2.2 Telerradiología	12
2.3 Indicadores de gestión	13
2.3.1 Indicador de oportunidad	14
2.4 Eventos discretos	15
2.5 Redes de Petri	16
2.5.1 Componentes de las redes de Petri	17
2.5.2 Habilitación y disparo de las transiciones	18
2.6 Petri Net Toolbox de MATLAB	18
3 Selección de IPS	23
3.1 Recopilación de datos	23
3.2 Cálculo de indicadores de oportunidad	25

3.3	Novedades	26
3.3.1	Categorización de novedades	27
3.3.2	Cálculo de novedades	30
3.4	Selección de IPS	30
4	Simulación del proceso de adquisición	33
4.1	¿Qué información se requiere para realizar el modelo?	33
4.2	Modelización del modelo de adquisición	34
4.2.1	Adquisición de tiempos	38
4.3	Análisis epidemiológico de pacientes del Hospital la Victoria	39
4.3.1	Cálculo de número de imágenes por estudio	43
4.4	Simulación del modelo de adquisición	44
4.4.1	Índices de rendimiento	44
5	Optimización del modelo de adquisición	49
5.1	Propuesta de optimización número 1	49
5.2	Propuesta de optimización número 2	52
5.3	Propuesta de optimización número 3	55
6	Conclusiones y trabajo futuro	61
6.1	Conclusiones	61
6.2	Trabajo futuro	62
7	Anexos	63
7.1	Anexo A: Porcentaje de novedades	64
7.2	Anexo B: Tiempo de oportunidad	65
7.3	Anexo C: Análisis epidemiológico	66
7.4	Anexo D: Encuesta a tecnólogos	67
7.5	Anexo E: Recomendaciones: Servicio de rayos X del Hospital la Victoria	70
7.6	Anexo F: Propuesta de encuesta a tecnólogos	75
	Bibliografía	78

Lista de Tablas

3-1	Tiempo promedio de oportunidad de las IPS en la ventana de seis meses . . .	26
3-2	Porcentaje promedio de novedades de las IPS en la ventana de seis meses . . .	30
4-1	Descripción de las actividades del proceso de adquisición de imagen de rayos X del Hospital la Victoria	37
4-2	Tiempo de las transiciones de modelo actual del Hospital la Victoria	38
4-3	Cuantificación de imágenes Rayos X por estudio del Hospital la Victoria . . .	43
5-1	Síntesis de los modelos propuestos	60

Lista de Figuras

1-1	Modelo de telerradiología	2
1-2	Proceso I+D+R	2
1-3	Porcentaje de aplicación de metodologías para la solución de problemas relacionados con gestión en servicios de salud. Tomado de [1]	5
1-4	Tiempo en horas desde la toma del examen hasta la solicitud de lectura de algunos prestadores remitores.	8
1-5	Número de novedades reportadas de algunos prestadores remitores.	8
2-1	Ficha técnica <i>Toma de la imagen - solicitud de lectura: oportunidad</i> . Tomado de [2]	15
2-2	Gráfica de definición de eventos discretos. Tomado de [3]	16
2-3	Componentes de una red red de Petri	17
2-4	Interfaz de la herramienta PN Tool de MATLAB.	19
2-5	Modo de operación de dibujo (PN Tool)	20
2-6	Modo de operación de exploración (PN Tool)	20
2-7	Ejemplo de uso de la herramienta <i>Diary</i> (PN Tool)	21
2-8	Ejemplo de uso de la herramienta <i>Scope</i> (PN Tool)	22
3-1	Interfaz de PACS de Advantage Health Systems SAS para descarga de información.	23
3-2	Interfaz del worklist del PACS de Advantage Health Systems SAS	24
3-3	Visualización de estudios	25
3-4	Reporte de novedades	27
3-5	Porcentaje de tipo de novedades de las IPS cliente situadas en la ciudad de Bogotá en la ventana de tiempo de seis meses	28
3-6	Cantidad de novedades por clasificación de las IPS cliente situadas en la ciudad de Bogotá en la ventana de tiempo de seis meses	29
3-7	Porcentaje de tipo de novedades del cliente I.M.I. de la ventana de tiempo de seis meses	31
3-8	Gráfica de comparación de número y tipo de novedad de la ventana de tiempo de seis meses	32
4-1	Ejemplo de transición del proceso de adquisición	33
4-2	Ejemplo de plaza y tokens del proceso de adquisición	34

4-3	Encuesta a tecnólogos del Hospital la Victoria sobre procesos	35
4-4	Encuesta a tecnólogos del Hospital la Victoria sobre tiempo total promedio del estudio	39
4-5	Encuesta a tecnólogos del Hospital la Victoria sobre complejidad de estudios	40
4-6	Número de estudios informados por rango de edad del Hospital la Victoria. Ventana de seis meses	41
4-7	Porcentaje de estudios informados por rango de edad del Hospital la Victoria. Ventana de seis meses	41
4-8	Número y porcentaje de estudios informados en pacientes de 0 a 5 años de edad	42
4-9	Número y porcentaje de estudios informados en pacientes de 60 años o más	42
4-10	Modelo actual del Hospital la Victoria basado en redes de petri.	45
4-11	Índices globales de desempeño de las transiciones del modelo actual del Hospital la Victoria.	47
4-12	Índices globales de desempeño de las plazas del modelo actual del Hospital la Victoria.	47
4-13	Gráfica del índice <i>Queue Length</i> de la plaza Paciente en espera.	48
5-1	Modelo de propuesta de optimización número 1	50
5-2	Índices globales de desempeño de las transiciones de propuesta de optimización número 1	51
5-3	Índices globales de desempeño de las plazas de propuesta de optimización número 1	51
5-4	Gráfica del índice <i>Queue Length</i> de la plaza Paciente en espera de la propuesta de optimización número 1	52
5-5	Modelo de propuesta de optimización número 2	53
5-6	Índices globales de desempeño de las transiciones de propuesta de optimización número 2	54
5-7	Índices globales de desempeño de las plazas de propuesta de optimización número 2	54
5-8	Gráfica del índice <i>Queue Length</i> de la plaza Paciente en espera de la propuesta de optimización número 2	55
5-9	Modelo de propuesta de optimización número 3	56
5-10	Índices globales de desempeño de las transiciones de propuesta de optimización número 3	57
5-11	Índices globales de desempeño de las plazas de propuesta de optimización número 3	57
5-12	Gráfica del índice <i>Queue Length</i> de la plaza Paciente en espera de la propuesta de optimización número 3	58
5-13	Gráfica del índice <i>Queue Length</i> de la plaza Datos ingresados y protocolo seleccionado de la propuesta de optimización número 3	59

7-1	Porcentaje de novedades respecto a estudios informados de cada mes	64
7-2	Tiempo de oportunidad de cada mes	65
7-3	Número de estudios de tipo de estudios según la estratificación de edad	66
7-4	Encuesta dirigida a los tecnólogos en radiología del Hospital la Victoria	67
7-5	Continuación 1. Encuesta dirigida a los tecnólogos en radiología del Hospital la Victoria	68
7-6	Recomendaciones: Servicio de rayos X del Hospital la Victoria	70
7-7	Continuación 1. Recomendaciones: Servicio de rayos X del Hospital la Victoria	71
7-8	Continuación 2. Recomendaciones: Servicio de rayos X del Hospital la Victoria	72
7-9	Continuación 3. Recomendaciones: Servicio de rayos X del Hospital la Victoria	73
7-10	Continuación 4. Recomendaciones: Servicio de rayos X del Hospital la Victoria	74
7-11	Segunda encuesta dirigida a los tecnólogos en radiología del Hospital la Victoria	75
7-12	Continuación 1. Segunda encuesta dirigida a los tecnólogos en radiología del Hospital la Victoria	76
7-13	Continuación 2. Segunda encuesta dirigida a los tecnólogos en radiología del Hospital la Victoria	77

1 Introducción

El estudio de la gestión en el campo de la salud es cada vez más comprendido desde un enfoque financiero, el cual incluye la gerencia estratégica y que en gran parte se centra en la gestión de procesos operativos, para esto es necesario en principio la investigación de operaciones, que como ciencia hace uso de dos tipos de aproximaciones cuantitativas de modelamiento para la toma de decisiones: la optimización y la simulación [4, 5]. En el caso de los departamentos de radiología uno de los retos mas grandes en la actualidad, en cuanto a gestión operativa, es enfrentar el aumento en la demanda de imágenes diagnósticas, en este sentido se requiere mejorar la atención al paciente que permita eficiencia, eficacia, exactitud y productividad en el diagnóstico e interpretación de imágenes médicas [6, 7].

Estas últimas se definen como un conjunto de técnicas y procesos usados para crear diferentes proyecciones del cuerpo humano con propósitos médicos para diagnosticar o realizar procedimientos terapéuticos, incluyendo el estudio de la anatomía, funciones y enfermedades. Las imágenes diagnósticas utilizan las propiedades fisicoquímicas de los diferentes tejidos y su interacción con diversos agentes físicos tales como el ultrasonido, los rayos X, los campos magnéticos y pulsos de radiofrecuencia [8].

En Colombia, los exámenes de rayos X (RX) son la principal imagen diagnóstica que los profesionales de medicina solicitan cuando el paciente tiene quejas de dolores o cuando hay sospecha de lesión. Con el paso del tiempo y con apoyo de la tecnología, éstos exámenes han logrado preservar un papel fundamental frente a los servicios de salud, por otra parte, la posibilidad de digitalizar imágenes ha facilitado el crecimiento en las modalidades de prestación de servicios, como es el caso de la telerradiología [9].

Radiología Digital S.A.S. es una IPS nacional que está habilitada como **prestador de referencia** en telerradiología, es decir, cuenta con talento humano capacitado y con las tecnologías de información y comunicaciones suficientes para brindar a distancia el apoyo requerido por otros **prestadores (remisores)** en el área de diagnóstico por imágenes médicas. Estos últimos hacen referencia a prestadores de servicios de salud con limitaciones de acceso o de capacidad resolutoria, que cuentan con tecnologías de información y comunicaciones que les permiten enviar y recibir información para prestar servicios o ser apoyados por otro prestador (Figura 1-1).

Los prestadores remitores (IPS Clientes) solicitan lecturas de sus imágenes diagnósticas a Radiología Digital S.A.S. y a través de las características anteriormente mencionadas de personal y tecnología, responden a la solicitud con la generación de un informe radiológico.



Figura 1-1: Modelo de telerradiología

Radiología Digital S.A.S. estableció un proceso denominado I+D+R que establece su quehacer misional para responder a las necesidades del sector salud, dicho proceso se resume en la Figura (1-2) y se explica a continuación:



Figura 1-2: Proceso I+D+R

- **Imaging:** en esta etapa se realiza la toma y envío de la imagen radiológica y este proceso, comúnmente, consta de los siguientes pasos:
 1. Atención del paciente: se realiza la explicación del procedimiento RX (ventajas y alternativas) y se indaga posible embarazo.
 2. Recepción de orden médica: se verifica la identidad del paciente, solicitud de estudio y motivo de examen.
 3. Diligenciamiento del consentimiento informado: explicación del procedimiento, sus beneficios, riesgos y firma por parte del paciente ó su representante.

4. Preparación del paciente y aplicación del protocolo: protección radiológica, dosis y colimación.
 5. Evaluación de la calidad técnica del estudio radiológico y envío al PACS.
 6. Solicitud de lectura e interpretación a Radiología Digital S.A.S.
- **Data:** etapa que se caracteriza por el análisis de los datos por parte del especialista médico (radiólogo), allí éste realiza la visualización de la imagen y la descripción de los hallazgos e impresión diagnóstica en un audio, el cual es enviado a transcripción.
 - **Report:** se realiza la transcripción del audio, la verificación de novedades y el envío del reporte radiológico a la IPS solicitante siendo ésta la última etapa del proceso I+D+R.

Por otra parte, una herramienta que es utilizada para medir el éxito de cualquier proceso como el anterior son los indicadores de gestión, los cuales evalúan y cuantifican el comportamiento y desempeño de un proceso, cuya magnitud, al ser comparada con algún nivel de referencia, puede estar señalando una desviación sobre la cual se toman acciones correctivas o preventivas según el caso [10, 11].

Para el caso de Radiología Digital S.A.S. se ha desarrollado, en una anterior pasantía, un software que logra calcular tiempos de oportunidad, es decir, el tiempo de demora entre procedimientos consecutivos y que son requeridos para un aprovechamiento óptimo, confiable y ágil para la capacidad de rendimiento [2].

En el presente trabajo se propone la optimización de los procesos de adquisición de imágenes de rayos X convencional de uno del los clientes de la empresa Radiología Digital S.A.S. con apoyo de simulaciones de redes de Petri.

1.1. Estado del arte

Durante las últimas décadas, las presiones de costos en los hospitales han obligado a los ejecutivos de estas empresas a dirigir sus organizaciones de manera más empresarial, el mayor desafío es brindar servicios de calidad a costos reducidos y evitando el uso ineficiente de los recursos, en consecuencia, se ha aumentado la creación y uso de herramientas que permiten realizar la gestión de los procesos en salud de forma adecuada, ejemplo de éstas son las simulaciones. [12].

En [1], se realizó una revisión de la literatura científica que estudia los problemas que presentan los servicios de urgencias hospitalarios, para identificar cuál o cuáles son las metodologías más pertinentes para abordar su gestión, donde se encontró que los temas más comunes para optimizar en este servicios son: la capacidad en la planificación y gestión en los hospitales,

la planificación de los servicios de ambulancias, la gestión de la cadena de suministros en bancos de sangre, la estimación de los riesgos de la salud pública, la estimación de los costos y los efectos de un tratamiento, la planificación y la asignación de recursos en un sistema de salud mental, la programación de servicios de salud a domicilio y la simulación de tiempos de servicio, entre otros.

En la Figura (1-3) se presentan las diferentes metodologías empleadas para solucionar los problemas relacionados con la gestión en servicios de salud encontrados en la revisión bibliográfica [1], en ella se evidencia en que porcentaje y para qué problemática de gestión son usadas estas metodologías de acuerdo a las referencias encontradas. Esta tabla refleja que las herramientas de simulación tienen un mayor porcentaje de uso, esto es debido a que los modelos formales y la simulación son las herramientas más útiles y efectivas para la planificación de la capacidad y la mejora de la eficiencia de sistemas de salud [12].

Un sistema hospitalario puede ser descrito como un Sistema de Eventos Discretos (DES, por sus siglas en inglés), en donde la dinámica depende de la interacción de eventos discretos que exhiben un alto grado de concurrencia y paralelismo, el uso de esta herramienta como metodología se puede ver reflejado en la Figura (1-3), en ella se observa que cuenta con el mayor porcentaje de uso encontrado en las referencias de las metodologías relacionadas con simulación. En la simulación de eventos discretos el estado de los cambios de los modelos sólo se da cuando los eventos o acciones ocurren, la ejecución del evento puede desencadenar otros eventos futuros, donde cada uno está marcado por su tiempo, por lo que el orden de generación no puede coincidir con el orden de ejecución [13].

La simulación de eventos discretos se utiliza cuando se requiere un nivel medio o bajo de abstracción del sistema, es decir, cuando se quiere estudiar el sistema desde un nivel operativo o táctico [14]. Entre los modelos DES, las redes de Petri (PN, por sus siglas en inglés) [15] ofrecen ventajas significativas por su doble representación: gráfica y matemática. Por lo tanto, PN puede emplearse para modelar efectivamente los servicios médicos hospitalarios.

Las PN fueron originadas por el matemático y científico en computación Carl Adam Petri alrededor de los años sesenta y desde entonces se han utilizado para modelar y analizar todo tipo de procesos con aplicaciones que van desde protocolos, hardware y sistemas integrados, hasta sistemas flexibles de fabricación, interacción del usuario y procesos, análisis en eficiencia de servicios [16].

Metodología	Resultados encontrados con los estudios	Porcentaje de aplicación de la metodología
Programación matemática	<ul style="list-style-type: none"> • Asignación óptima del personal. • Reducción en el tiempo de espera de los pacientes. • Reducción en los costos de gestión. • Mejorar el <i>ranking</i> del hospital. • Elevar el nivel de satisfacción del paciente. 	31%
Heurística - Metaheurística	<ul style="list-style-type: none"> • Herramienta para programación de recursos y rotación de turnos del hospital. • Disminución de los tiempos de espera de los pacientes. 	8%
Simulación		
Simulación Montecarlo		3%
Simulación de eventos discretos	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluación de nuevos procesos • Disminuir los tiempos de espera para que los pacientes sean atendidos. • Optimizar los tiempos de atención del médico en urgencias. • Mejorar el rendimiento de los procesos asistenciales. 	35%
Dinámica de sistemas	<ul style="list-style-type: none"> • Disminuir los tiempos de espera de los pacientes. • Realizar mejoras en los flujos de pacientes y la capacidad del sistema. • Evaluar los efectos de las propuestas y políticas implementadas para el mejoramiento del servicio de urgencias. • Analizar la utilización de camas y el retraso en situaciones de emergencia. 	18%
Simulación basada en agentes		5%

Figura 1-3: Porcentaje de aplicación de metodologías para la solución de problemas relacionados con gestión en servicios de salud. Tomado de [1]

En la literatura se pueden encontrar diferentes propuestas de modelado de procesos relacionados a la atención en servicios de salud, por ejemplo, en [17] se usa un modelo de redes

de Petri para evaluar la efectividad del protocolo actual de emergencia frente a brotes infecciosos. En [18] se formula un modelo de Petri que busca minimizar riesgos de seguridad en la información y registros en la industria de la salud, en este caso se aplicó al problema de la ingesta que es un procedimiento aplicado a pacientes nuevos que solicitan atención no urgente en una institución de salud mental, si bien este último está más relacionado al sistema de gestión sanitaria es uno de los más importantes y necesarios en una institución de salud.

Un ejemplo de metodología del modelado para un sistema de salud basado en redes de Petri es [19], en este artículo basándose en que una enfermedad de un paciente es diagnosticada y curada siguiendo una secuencia de tratamientos y cuidados que pertenecen a un protocolo médico, se propuso un modelo de Petri que relaciona los servicios del hospital con los recursos disponibles basándose en los protocolos.

1.2. Planteamiento del problema

Uno de los objetivos misionales de la I.P.S. Radiología Digital S.A.S. es la entrega oportuna del reporte radiológico, por ello, gracias al desarrollo de una herramienta software en un proceso de pasantía previo: “Protocolo semiautomático para el cálculo de indicadores de oportunidad en el proceso de adquisición, lectura y reporte (I+D+R) de imágenes radiológicas” [2], se pudo realizar el cálculo de indicadores de oportunidad, haciendo posible identificar puntos débiles en el proceso misional: Imaging + Data + Report.

Los indicadores de oportunidad y el número de novedades (errores en la adquisición de la imagen) se pueden ver negativamente afectados por una inadecuada adquisición de la imagen radiológica, cuyas causas pueden ser varias: falta de capacitación del personal en los prestadores remitores, sobrecarga de trabajo o simplemente un descuido del tecnólogo (no envía proyecciones completas, marcación incorrecta, envía imágenes incorrectas o no las envía, entre otros).

En el sector salud no se pueden dar el lujo de perder tiempo por realizar una inadecuada toma de imagen, que además de generar costos adicionales y pérdida de tiempo obligará al paciente en algunos casos a repetir la toma, que por el uso de radiación ionizante es perjudicial para el mismo. Es decir, no sólo genera un impacto negativo en la atención eficaz del paciente, sino que además puede poner en riesgo su vida.

La falta de estandarización en el proceso se puede considerar uno de los principales problemas de esta etapa y aunque no depende de Radiología Digital S.A.S. lo afecta directamente y a los pacientes, ya que entre sus objetivos misionales está la entrega de este reporte en un

tiempo menor a 24 horas.

En el presente trabajo de grado se propone optimizar el proceso de toma de rayos X por medio de redes de Petri de un cliente de la IPS Radiología Digital S.A.S. con el fin de disminuir los tiempos de oportunidad y el número de novedades.

A partir de la simulación del sistema actual se analizarán y modificarán diferentes variables con el fin de generar una optimización que permita mejorar procesos en la adquisición de las imágenes radiológicas e impactar en la cadena de la generación del reporte radiológico. Con los resultados arrojados por la simulación optimizada se generará un reporte a la IPS seleccionada, en el que se presentarán los hallazgos encontrados y recomendaciones.

1.3. Justificación

Las imágenes diagnósticas constituyen uno de los elementos más importantes en la práctica de la medicina moderna [20]. Gracias al acelerado crecimiento de la tecnología en especial a los recursos dirigidos al área de la salud se han logrado avances que van desde la digitalización de éstas hasta optimizar el acceso de información médica entre profesionales e instituciones del sector de la salud en tiempo real.

Se decide evaluar los procesos de la toma de rayos X convencional al ser la imagen diagnóstica más solicitada para lectura e interpretación en la IPS con un volumen aproximado del 88 %, un diagnóstico puede ofrecer una retroalimentación tanto a los tecnólogos como al departamento de imágenes diagnósticas para mejorar el proceso de *imaging*, asegurando tiempos de respuesta más aptos y disminución en el número de novedades que finalmente se verá reflejado en una atención oportuna y de calidad al paciente.

A continuación, se expone la magnitud del tiempo crítico entre la toma de los rayos X (disparo) y la solicitud de lectura en (Figura 1-4), perteneciente al mes de septiembre del año 2019 de algunos de los clientes remitores de Radiología Digital S.A.S. En esta figura se evidencia un tiempo de oportunidad de hasta tres horas y media.

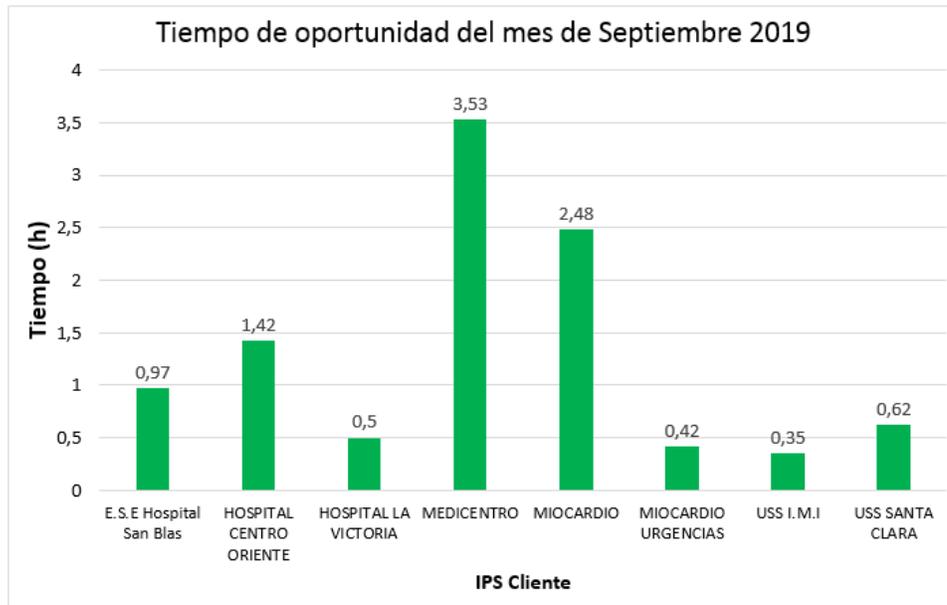


Figura 1-4: Tiempo en horas desde la toma del examen hasta la solicitud de lectura de algunos prestadores remitores.

También, un ejemplo de la magnitud de las novedades se puede considerar en (Figura 1-5) de algunos prestadores remitores y perteneciente al mes de septiembre, donde se puede evidenciar un reporte significativo de novedades que en algunos casos superan 15 novedades.

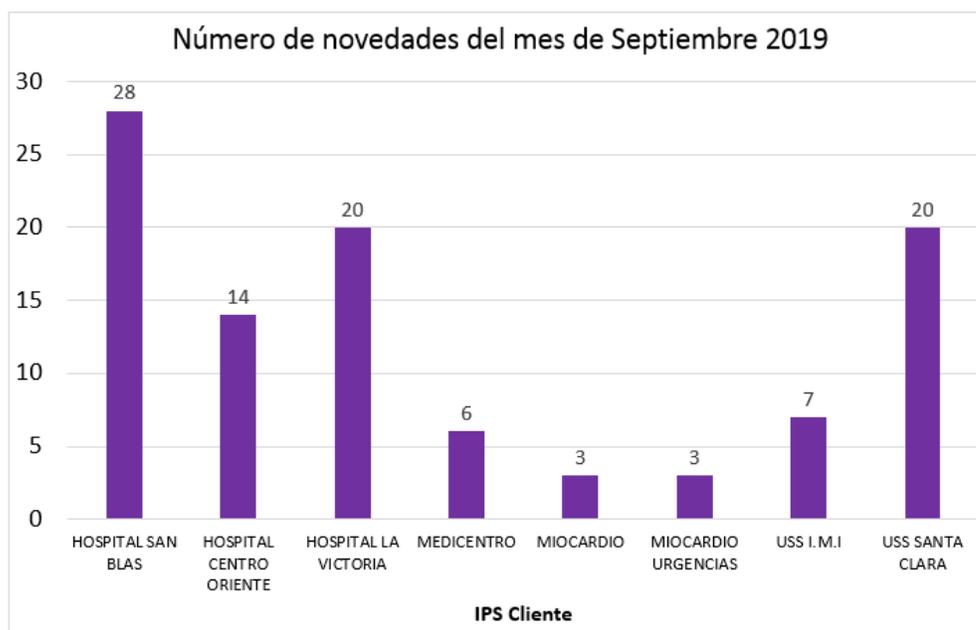


Figura 1-5: Número de novedades reportadas de algunos prestadores remitores.

No obstante, se debe limitar el proceso a sólo una IPS de los 19 prestadores remitores ya que cada área de radiología posee procesos independientes que hacen extenso el análisis en cada una, también se realiza limitación geográfica a la ciudad de Bogotá ya que allí es en donde se solicita el mayor volumen de imágenes para lectura.

Para soportar las recomendaciones que se plantearán es necesario realizar una simulación del proceso a evaluar, se resuelve hacer el modelado con redes de Petri que posee una simplicidad en su mecanismo básico, se aprovecho que la universidad dispone del software MATLAB que entre sus herramientas puede integrar una herramienta Petri net que permite la simulación de dicho proceso.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Optimizar, utilizando redes de Petri, el proceso de adquisición de imágenes diagnósticas de rayos X para un cliente prestador remitores de la IPS Radiología Digital S.A.S.

1.4.2. Objetivos Específicos

1. Calcular los tiempos de oportunidad entre la toma del examen y la solicitud de lectura de las IPS de Bogotá de los últimos seis meses correspondientes al año 2019.
2. Categorizar las novedades de las IPS de Bogotá de los últimos seis meses correspondientes al año 2019.
3. Seleccionar la IPS con mayor problemática en el proceso de *imaging* de acuerdo con los indicadores de oportunidad y el número de novedades.
4. Simular el proceso de *imaging* de la IPS remitora seleccionada mediante redes de Petri con el apoyo de la herramienta de software Petri Net Toolbox de MATLAB y los datos consultados en el departamento de ingeniería de la IPS.
5. Optimizar el proceso *imaging* para la IPS remitora mediante redes de Petri.
6. Generar un reporte con recomendaciones para la optimización el proceso *imaging*.

1.5. Alcance

Este trabajo fue enfocado en las IPS clientes ubicadas en la ciudad de Bogotá por las limitantes que representaba el traslado a diferentes ciudades, de éstas se eligió una para realizar

la evaluación y optimización.

La metodología que en principio se planteo tuvo que tener numerosas modificaciones, muchas de ellas en parte generadas por las restricciones de traslados (cuarentena) debido a la emergencia sanitaria que generó la llegada del virus COVID-19 a la ciudad.

1.6. Organización del documento

El presente trabajo de grado presentado bajo la modalidad de pasantía, realizada en la IPS Radiología Digital S.A.S., se divide en seis capítulos, el presente capítulo es introductorio y en él se realiza una contextualización sobre los procesos de la empresa, la justificación y la problemática que será resuelta en el presente trabajo.

En el Capítulo 2, se presentan los conceptos más importantes para la comprensión del trabajo.

En el Capítulo 3, se presenta la metodología para elegir el mejor candidato para optimizar, los criterios para esta selección son: el tiempo de oportunidad entre la toma del examen y la solicitud de lectura, y el porcentaje y tipo de novedades que reportan cada una de las IPS cliente de Radiología Digital S.A.S. ubicadas en la ciudad de Bogotá desde el primero de Julio de 2019 hasta el 31 de Diciembre del mismo año.

En el Capítulo 4, se realiza la obtención de datos necesarios y simulación del proceso actual para la adquisición de imágenes de rayos X convencional que maneja la IPS seleccionada en el capítulo anterior.

En el Capítulo 5, se realizan cambios en la simulación del modelo actual de la IPS seleccionada con el fin de mejorar los procesos de la toma de la imagen diagnóstica, en esta parte del documento se reportan los resultados más importantes que concluyen con un modelo optimizado del proceso de adquisición de imágenes de rayos X.

Finalmente en el Capítulo 6 se presentarán las conclusiones y trabajos futuros.

2 Marco teórico

En este capítulo se realizará una revisión bibliográfica de conceptos que permitirán contextualizar el proyecto, en él se abordará desde el papel que cumplen los rayos X hasta las definiciones que en el momento de realizar el diseño y optimización del proceso serán útiles.

2.1. ¿Qué son rayos X?

Los rayos X son un tipo de radiación electromagnética ionizante que fue descubierta en 1895 por el ingeniero mecánico y físico alemán Wilhelm Konrad Röntgen tras experimentar con un tubo de rayos catódicos trayendo como consecuencia importantes aportes para la física atómica, la medicina y la tecnología, además de dar origen en ese momento a la especialidad médica que se conoce como radiología [21].

Estas ondas se caracterizan por tener una longitud de 1 a 2 amperios que les permite interactuar con la materia (es ahí donde se produce la ionización de los átomos que origina partículas con alta carga de reactividad) [22]. Ésto sumado a su alta capacidad de penetración lo hace un candidato ideal para viajar a través del cuerpo humano y de un detector de rayos X ubicado al otro lado del cuerpo, formando una imagen que representa las “sombras” formadas por los tejidos y las estructuras dentro del cuerpo [23, 21].

Para formar la imagen radiológica los rayos X son disparados desde el tubo de rayos hacia una placa donde se atenúan a medida que son absorbidos en diferentes cantidades por diferentes tejidos (dependiendo de la densidad de los mismos) [24]. Wilhelm realizó la primera radiografía humana usando la mano de su esposa y bautizó las ondas como “rayos incógnita” o “rayos X” al ignorar como éstas se originaban.

Desde entonces estos rayos han tenido un papel fundamental para detectar y tratar a tiempo enfermedades y contusiones, con ellos se estudia el sistema esquelético, respiratorio, gastrointestinal, urinario y cardiovascular [21]. Entre los exámenes que hacen uso de los rayos X están: rayos X convencional, mamografía, tomografía computarizada, fluoroscopia y radioterapia, en este trabajo el enfoque será al examen de rayos X convencional debido a que es el examen que maneja el mayor volumen de solicitud de lectura en Radiología Digital S.A.S. con alrededor de 88 % de su labor total.

Gracias a avances tecnológicos es posible la radiología digital, que se obtiene o directamente en formato digital de algunos equipos de rayos X o en otros casos se escanea de las placas de rayos X convencional (digitalizador) para obtener las imágenes digitales, este formato permite el tratamiento, almacenamiento y transferencia de las imágenes como un archivo. Con ello la necesidad de aumentar sistemas digitales que permitan estas acciones con toda la codificación con la que una imagen médica y sus datos debe ser tratada, para el almacenamiento y distribución de las imágenes de los clientes remitores, la herramienta que se usa son los PACS (por sus siglas en inglés *Picture Archiving and Communication System*), que en el caso de Radiología Digital S.A.S. es distribuido por Avantage Health System.

2.1.1. Riesgos asociados a la toma de rayos X convencional

Las personas están constantemente expuestas a fuentes naturales de radiación ionizante en niveles muy bajos, que puede provenir del suelo, sol, agua, rocas, hasta de su mismo organismo. sin embargo, la dosis es tan baja que no genera efectos biológicas que causen problemas en la salud.

Los efectos que produce la radiación ionizante de los rayos X se producen proporcionalmente a la cantidad de radiación absorbida (energía) y la radiosensibilidad de las células que la absorben [25], es decir, depende de la dosis que el tecnólogo configure en el examen, repetición de tomas y características físico-químicas del paciente, la edad, genero y tipo de estudio.

Según la OMS (Organización mundial de la salud), la reiteración o una alta dosis de radiación del examen pueden generar mutaciones en las cadenas de ADN, que posteriormente podría desencadenar enfermedades como el cáncer, siendo entonces catalogados como carcinógenos [26].

2.2. Telerradiología

La telerradiología es un área de la telemedicina que nace a raíz de un incremento en la demanda de toma de exámenes radiológicos, digitalización de las placas radiológicas y los avances tecnológicos de los equipos que realizan la adquisición [27]. Si se usa de forma adecuada genera un beneficio directo en la atención a los pacientes, ya que, además de evitar traslados innecesarios, también genera el reporte de los resultados de forma más rápida y accesible.

Según: *Standards for the Provision of Teleradiology within the United Kingdom* la telerradiología hace referencia a la transmisión de imágenes y datos asociados para la interpretación primaria y revisión clínica [28], mientras que *American College of Radiology* (ACR) agrega que gracias a la misma, los hospitales y los centros de urgencias médicas en lugares remotos sin un médico especialista en radiología, pueden transmitir imágenes a gran distancia para

que las analicen e interpreten oportuna, efectiva y eficientemente. Adicionalmente, permiten a los especialistas realizar interconsultas, gracias a que las imágenes pueden ser vistas simultáneamente desde ambos lugares es posible conseguir un segundo diagnóstico o la opinión de un experto e incluso atender varias clínicas o centros radiológicos desde un mismo puesto de trabajo [29].

En el estudio desarrollado en [30], se realizó un análisis sin tener en cuenta la inversión en equipos de la implementación del servicio de telerradiología, en el que se logró demostrar que podía disminuir los tiempos de oportunidad de más de dos meses a tan solo cinco días, también se halló una disminución de costos hasta del 57%, entre otros beneficios tanto para el paciente como para el servicio.

La telerradiología también tiene sus puntos débiles, por ejemplo, todo el sistema requiere un nivel de calidad que permita la transmisión de imágenes y datos evitando cualquier tipo de pérdida de datos clínicos significativos en el proceso que pueda generar un reporte erróneo de la lectura. El sistema de comunicación también debe ofrecer una seguridad especial, ya que los datos que se manejan son de alta sensibilidad y se debe asegurar confidencialidad al paciente.

También entre las dificultades más frecuentes para la incorporación de la telerradiología a las instituciones prestadoras de salud es la adecuación de la infraestructura de las telecomunicaciones (sistemas de visualización, accesibilidad a internet suficiente, monitores de información, entre otros) [31]. A nivel nacional las principales dificultades que se presentan para prestar este servicio es la escasez de radiólogos, inoportunidad en el servicio en la toma y en el reporte, sobre costos por contratación externa y una falta de registros estadísticos e indicadores de gestión [32].

2.3. Indicadores de gestión

En [33] se define los indicadores de gestión como: “una relación entre las variables cuantitativas o cualitativas, que permite observar la situación y las tendencias de cambio generadas en el objeto o fenómeno observado, respecto de objetivos y metas previstos e influencias esperadas”. En la actualidad estas herramientas han logrado tener una gran acogida en la gerencia de empresas u organizaciones por los beneficios de evaluación y control que estos presentan en la planeación estratégica de éstas.

Los indicadores sirven como herramienta para conocer el desempeño de las empresas y de sus procesos frente a diferentes aspectos, respecto a los objetivos alcanzar, en [34] se establece que, “en una organización se debe contar con el mínimo número posible de indicadores que nos garanticen contar con información constante, real y precisa sobre aspectos tales como: efectividad, eficiencia, eficacia, productividad, calidad, la ejecución presupuestal, la inciden-

cia de la gestión, todos los cuales constituyen el conjunto de signos vitales de la organización”.

Entre los principales usos de estos indicadores está: evaluar el desempeño frente a sus metas, objetivos y responsabilidades respecto a otras empresas o la misma a fin de monitoreo, prever a tiempo desviación de objetivos y evaluar en que porcentaje se están cumpliendo [34]. Esta información permite tener un control de los procesos que se realizan, identificar puntos débiles en ellos y proporcionar una ayuda para la toma de decisiones (por ejemplo, priorizar actividades según sus necesidades de cumplimiento) que permitan a la empresa mantener una estabilidad o progreso frente a sus competidores.

Estos indicadores deben contar con unas características mínimas para su correcto funcionamiento, los principales son: que sea entendible (que todos tengan conocimiento de su significado y como usarlo, para esto lo ideal es una ficha técnica), medible o cuantificable y controlable.

2.3.1. Indicador de oportunidad

El indicador de oportunidad es un indicador de gestión que proporciona información respecto al tiempo y calidad en la ejecución de una actividad de un servicio relacionado, en pocas palabras indican la conveniencia en tiempo y lugar en que se realizan las acciones de forma adecuada [35].

Según la ficha básica del indicador de oportunidad en la atención al cliente en el área de imagenología en la Resolución 1446 de 2006, “este tiempo de respuesta del prestador de servicios es útil para medir la suficiencia institucional para atender la demanda de servicios que recibe, orientando decisiones de mejoramiento, puede servir para la evaluación contractual entre las entidades promotoras de salud y los prestadores”.

En [2] se desarrollaron indicadores de oportunidad capaces de medir el tiempo en diferentes etapas de proceso de telerradiología, ejemplo de esto es la Figura (2-1) que muestra la ficha técnica del indicador, allí se presenta tanto el objetivo del proceso como del indicador, que va desde que se toma la imagen diagnóstica hasta que el tecnólogo realiza la solicitud de lectura. Este indicador en especial tendrá un papel fundamental como criterio de selección de la IPS cliente en el siguiente capítulo.

	PROCESO: I+D+R		CÓDIGO	I DR-I-01
	FICHA TÉCNICA INDICADOR DE OPORTUNIDAD		VERSIÓN	01
FECHA DE APROBACIÓN (dd/mm/aaaa)			4/12/2018	

FICHA TÉCNICA: INDICADOR OPORTUNIDAD				
Fecha de Creación:	26/02/2018			
Proceso	Toma, Lectura y Reporte de las imágenes médicas	Objetivo del Proceso	Prestar un servicio de Telerradiología, en las siguientes modalidades de imágenes médicas: Radiología convencional (CR, DX), Mamografía (MG), Tomografía Computarizada (TAC), Resonancia Magnética Nuclear (MRN) como centro de referencia, basado en un modelo innovador, oportuno y resolutivo, fundamentado en la gestión de I+D+I y la gestión Tecnológica.	
Nombre del Indicador	OPORTUNIDAD ENTRE LA TOMA Y SOLICITUD DE LECTURA DE LAS IMÁGENES MÉDICAS	Objetivo del Indicador	DETERMINAR EL TIEMPO TRANSCURRIDO (EN HORAS) DE LOS ESTUDIOS REALIZADOS ENTRE LA TOMA DE LA IMAGEN HASTA LA SOLICITUD DE LECTURA DE LAS IMÁGENES MÉDICAS POR PARTE DEL PRESTADOR REMISOR.	
Tipo de Indicador	Proceso	Línea base		
Descripción del Indicador	CALCULA LA MEDIDA ESTADÍSTICA DE TENDENCIA CENTRAL MAS ADECUADA (PROMEDIO, MEDIANA, MODA) DEL TIEMPO TRANSCURRIDO (EN HORAS) DE LAS ESTUDIOS QUE FUERON TOMADOS Y SOLICITADOS PARA LECTURA A TRAVÉS DE LA MODALIDAD DE TELERRADIOLOGÍA.		Unidad de medida	PROMEDIO
Estandar	Institucional	Meta		
Formula	Sumatoria del número de horas transcurridas de la toma de la imagen hasta la solicitud de lectura /Total de mediciones (exámenes) realizadas en el tiempo establecido.			

Figura 2-1: Ficha técnica *Toma de la imagen - solicitud de lectura: oportunidad*. Tomado de [2]

2.4. Eventos discretos

En [3] se definen los eventos discretos como “todas aquellas acciones o resultados de un experimento que tienen como resultado un número entero”. Su estudio ha sido fundamental en el área de matemáticas discretas, que más adelante darían origen a la combinatoria, análisis árboles de cobertura, grafos, entre otros.

Un sistema de eventos discretos se relaciona con un comportamiento de secuencia finita o infinita de estados delimitados por eventos que ocurren en puntos separados por intervalos de tiempo (Figura 2-2). El apoyo que ha generado los avances en computación y el diseño de programas para la simulación de estos eventos han permitido analizar sistemas cada vez mas complejos.

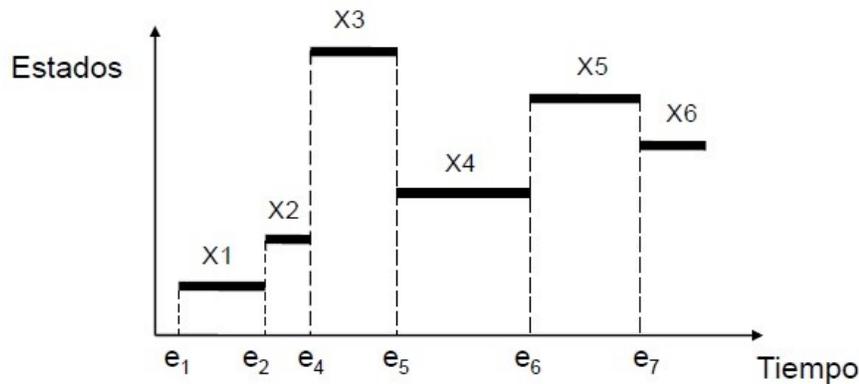


Figura 2-2: Gráfica de definición de eventos discretos. Tomado de [3]

2.5. Redes de Petri

Estas redes fueron creadas por Carl Adam Petri en su tesis de doctorado “Kommunikation mit Automaten” (Comunicación con autómatas) publicada en 1962, en ella formuló la base de la teoría de redes de Petri en solución al conflicto de sistemas con componentes paralelos (múltiples procesos que se ejecutan en simultaneo) y concurrentes (procesos que se ejecutan de forma independiente pero que pueden interactuar entre sí) para el análisis de algoritmos de computación, descrito en [36] como la necesidad de jerarquizar el control en las actividades que constituyan puntos críticos, priorizándolas sobre el resto.

Más tarde un grupo de investigadores del Applied Data Research Inc. proporcionarían a la teoría una notación y representación en un proyecto titulado “Information System Theory Project”, pero no fue hasta la publicación en 1970 de “Events and Conditions” publicado por Anatol Holt (el líder de este grupo) y Commoner donde se demostró que podrían ser aplicadas al modelado y análisis de sistemas de eventos discretos [37].

Las redes de Petri (RdP o PN por sus siglas en inglés) son grafos que permiten modelar sistemas y/o procesos de flujo de información u objetos permitiendo extraer de ellos información tanto de su estructura como de su comportamiento dinámico con el fin de evaluarlos y optimizarlos [37]. Su base matemática combinado con su representabilidad gráfica ha hecho de estas redes uno de los formalismos más aceptados en las aplicaciones de ingeniería y se han logrado posicionar como una herramienta fundamental para modelar sistemas dinámicos de eventos discretos en diferentes campos de la industria [38].

2.5.1. Componentes de las redes de Petri

Una red de Petri se describe como el siguiente conjunto y su representación se puede apreciar en la Figura (2-3):

$$PN = \{P, T, F, W, M_0\}$$

Donde:

$$P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_m\}$$

P es un conjunto finito de **plazas o lugares**: son representadas por circunferencias y hacen referencia a los estados del sistema, las causas o condiciones. En ellas contiene la capacidad que puede manejar, es decir, el número máximo de tokens que puede almacenar.

$$T = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_m\}$$

T es un conjunto finito de **transiciones**: son representadas por segmentos rectangulares y hacen referencia a las acciones o eventos que cambian los estados y que se activan de acuerdo a unas condiciones.

En conjunto P y T cumplen con: $A \cap T = \emptyset$ y $A \cup T \neq \emptyset$

F es el conjunto de **arcos dirigidos**: se representan con flechas que van desde las plazas hacia las transiciones o viceversa, estos tienen el objetivo de imponer las condiciones de entrada a las transiciones y generar el resultado a la salida de estas a partir de la siguiente función:

$$W : F = \{1, 2, 3, 4, \dots\}$$

$W : F$ es un función que especifica el peso de los arcos, este peso indica la cantidad de **tokens** (se representan como puntos o cantidad de ellos dentro de la plaza) que consume o deposita una plaza.

$$M_0 : P = \{1, 2, 3, 4, \dots\}$$

$M_0 : P$ indica el estado inicial de la red también llamado marcado inicial.



Figura 2-3: Componentes de una red red de Petri

2.5.2. Habilitación y disparo de las transiciones

Para simular el comportamiento dinámico y concurrente del sistema, el modelo cambia su marcado inicial $M_0 : P$ de acuerdo a las siguientes reglas:

- Una transición se habilita cuando las plazas que poseen de entrada están marcadas con al menos $w(p, t)$ tokens, donde $w(p, t)$ es el peso del arco que va desde la plaza hasta la transición.

- Cuando la transición es habilitada se genera el llamado disparo, este consiste en eliminar $w(p, t)$ tokens de los lugares de entrada a la transición y añadir $w(p, t)$ tokens a los lugares de salida.

- El disparo de una transición habilitada depende de la configuración del modelo (de naturaleza determinista o no).

2.6. Petri Net Toolbox de MATLAB

El Petri Net Toolbox (PN Toolbox) es una herramienta de software diseñado, implementado y probado en el Departamento de Control Automático e Informática Industrial de Universidad Técnica Gheorghe Asachi de Iași que permite la simulación, análisis y diseño de sistemas de eventos discretos, basado en modelos de red de Petri e integrado en el entorno MATLAB. Una de las características más importantes es el diseño de su interfaz que refleja un uso casi intuitivo (Figura 2-4), la capacidad de las plazas o lugares puede llegar a ser infinita, la asignación de prioridades o probabilidades a transiciones conflictivas y diversos ejemplos incluidos. [39, 40, 41].

La barra de menú ubicada en la parte superior de la interfaz observada en Figura (2-4) habilita sus opciones de acuerdo al modo en operación en el que se este trabajando, esta herramienta posee dos modos: modo dibujo y modo de exploración.

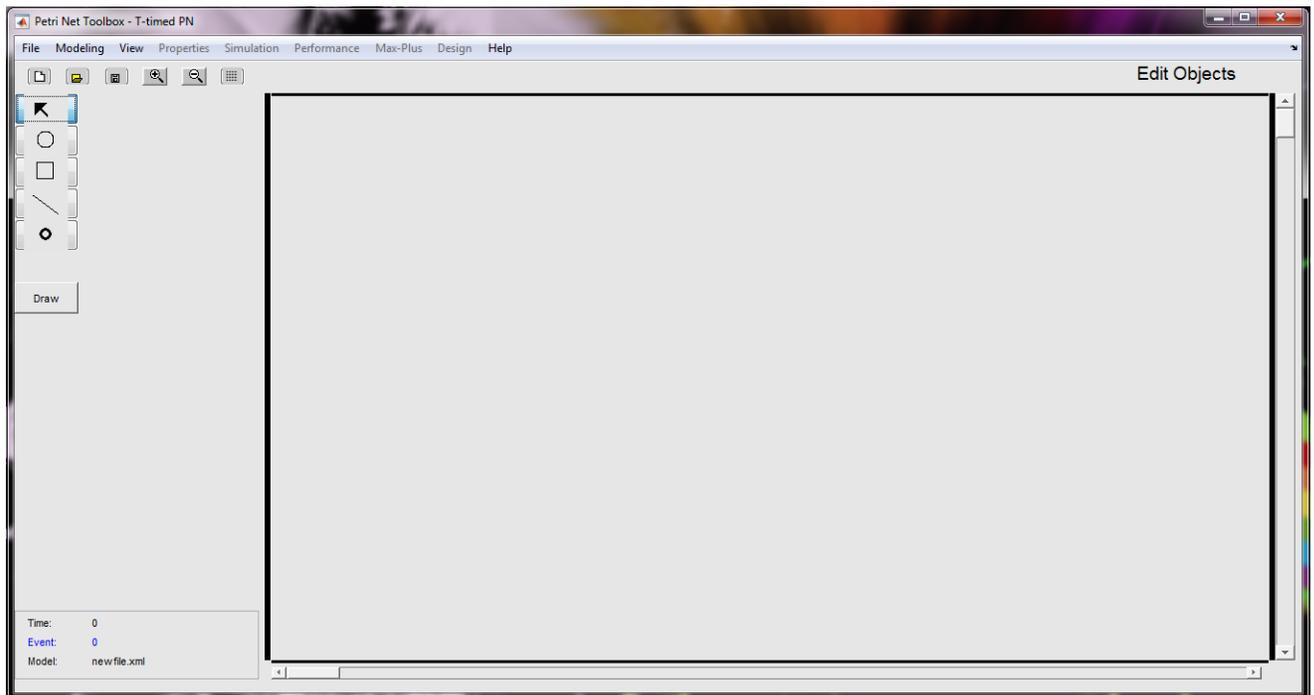


Figura 2-4: Interfaz de la herramienta PN Tool de MATLAB.

1. **Modo de dibujo:** en este modo se realiza la construcción de la red de Petri (Figura (2-5)), el panel de dibujo ubicado en la parte izquierda proporciona los botones que permiten configurar o modifican las características de estos (tiempo de habilitación de transición, peso de arcos, etiquetas de los componentes...), agregar las plazas, transiciones, arcos y tokens.

Esta construcción se realiza en el panel de dibujo que está ubicado en la parte derecha, en este panel se puede habilitar una cuadrícula y manejar el acercamiento. Para pasar al otro modo basta con oprimir el botón ubicado en la parte inferior del panel de dibujo que tiene como etiqueta “Draw”.

2. **Modo de exploración:** este modo proporciona un panel de simulación con cuatro botones que permiten que la simulación: sea reiniciada, ejecutada paso a paso (cambio de transiciones de habilitada hasta el disparo o de disparo a deshabilitada), de ejecución lenta o rápida.

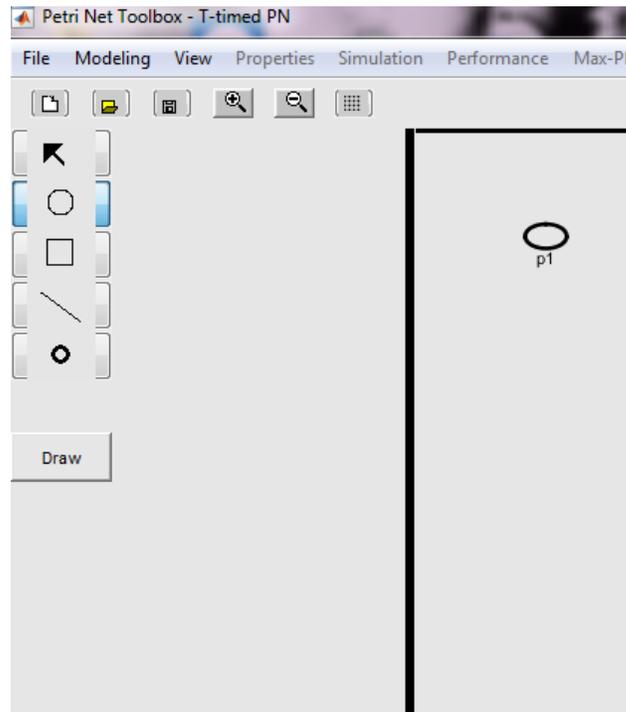


Figura 2-5: Modo de operación de dibujo (PN Tool)

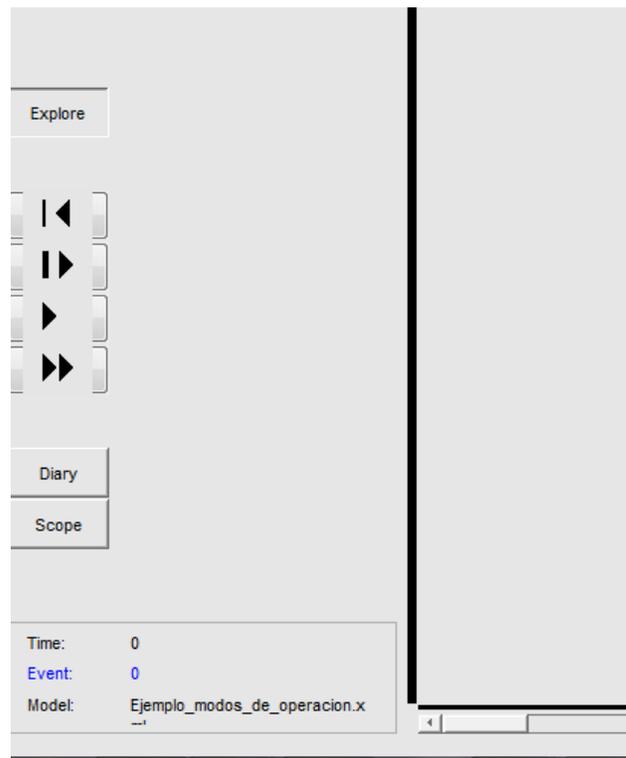


Figura 2-6: Modo de operación de exploración (PN Tool)

Este modo también posee otras dos opciones que se encuentran ubicadas en la parte inferior del panel de simulación y que permiten analizar el comportamiento dinámico de la simulación mientras se esta ejecutando: *Diary* que muestra una lista de las transiciones que están próximas a disparo con el respectivo tiempo en la simulación y *Scope* que gráfica un índice de rendimiento de una plaza o transición que serán explicados mas adelante. En la parte inferior de este panel también se puede visualizar el tiempo de la simulación, el número de eventos ejecutados y el nombre del archivo.

Ejemplo del uso de la herramienta *Diary* es la Figura (2-7), en ella se puede observar que es una ventana externa de MATLAB, en ella se muestra que la primera transición en la lista es la etiquetada como “Espera”, esta se encuentra de color azul en esa ventana y de color rojo en la simulación debido a que en ese instante de tiempo se esta ejecutando o disparando. Las siguientes dos transiciones en la lista son “Digitalizando y arreglando imagen” y “Paciente llegando” con el respectivo tiempo en el que se dispararan, es decir, estas serian las próximas transiciones en dispararse y en la imagen se puede apreciar que estas se encuentran de un color interno rojo, este es el indicativo de que la transición se encuentra habilitada.

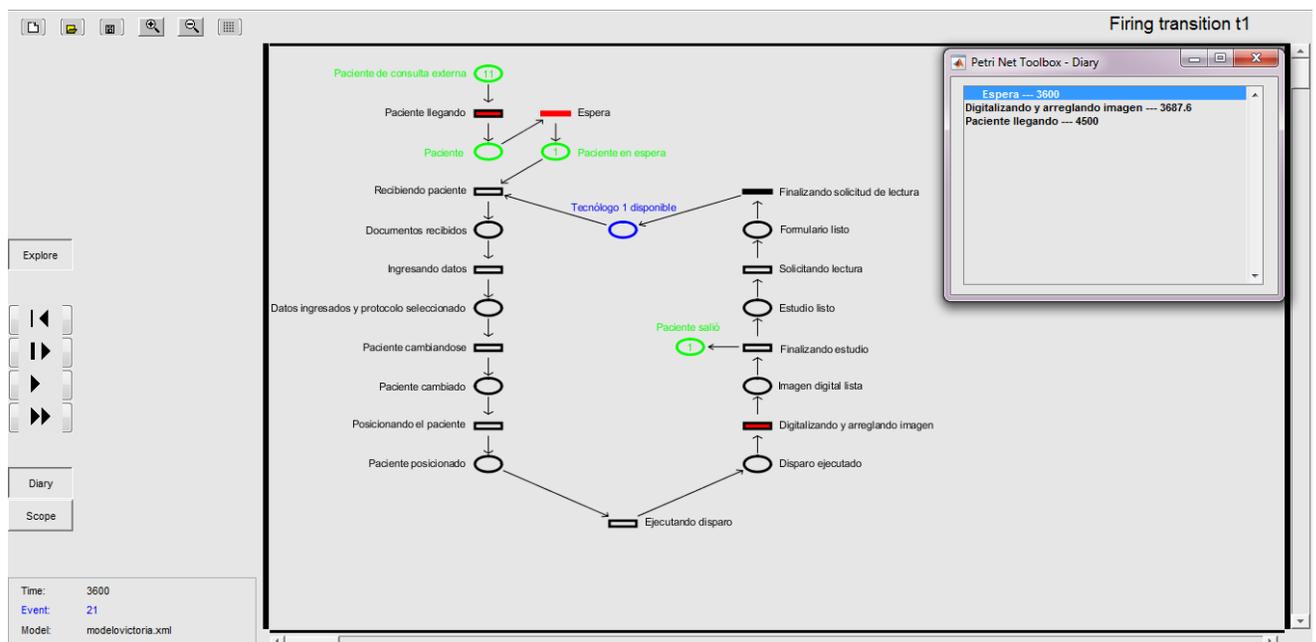


Figura 2-7: Ejemplo de uso de la herramienta *Diary* (PN Tool)

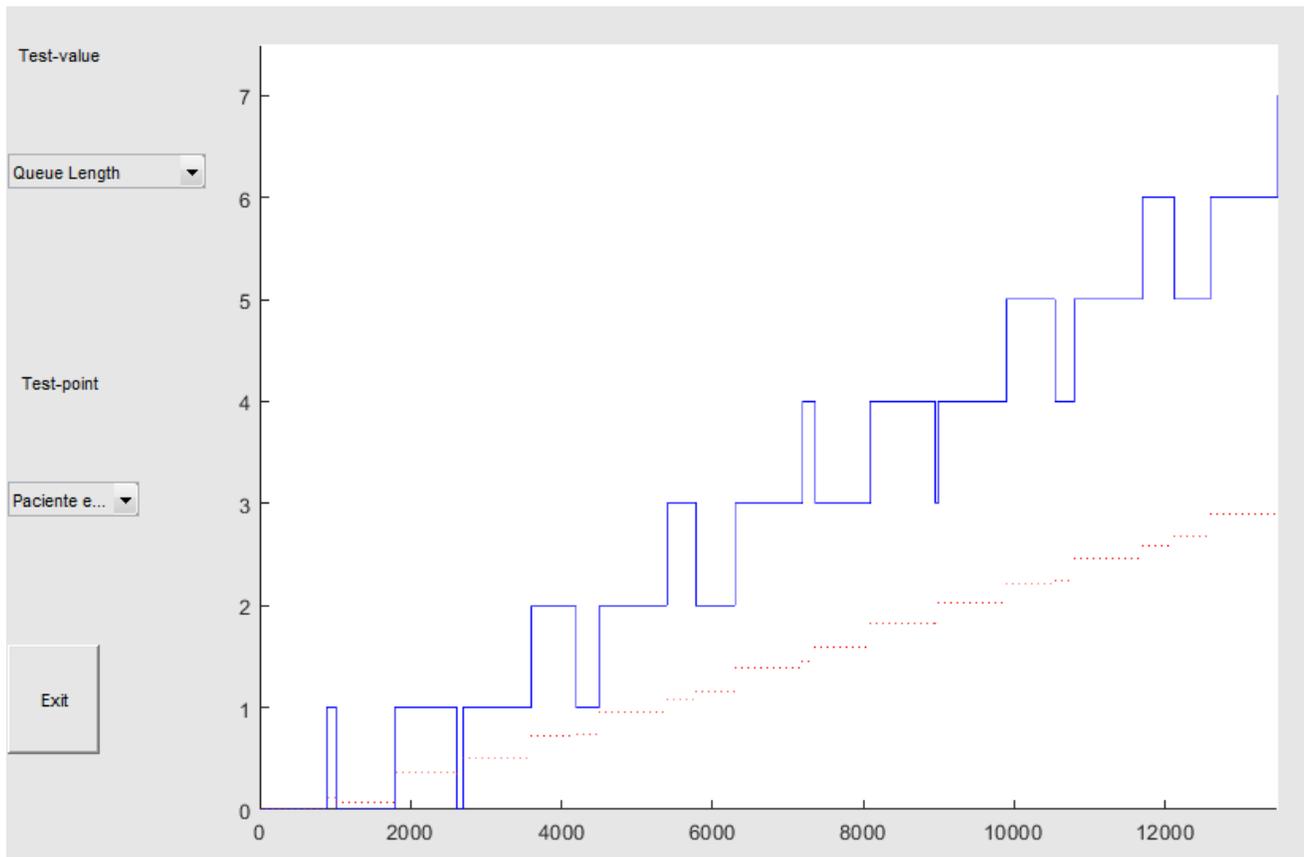


Figura 2-8: Ejemplo de uso de la herramienta *Scope* (PN Tool)

La herramienta *Scope* permite visualizar la dinámica de un índice de rendimiento de un componente durante la simulación, en la Figura (2-8) se muestra la gráfica que genera, el eje horizontal es tiempo en segundos y el eje vertical hace referencia al número de eventos. La gráfica proporciona dos datos, la línea de color azul traza la evolución del índice de rendimiento actual y la línea roja representa la evolución del índice de rendimiento global.

3 Selección de IPS

En este capítulo se expone cómo se realizó la recolección de la información (base de datos) y la metodología que concluyó en la selección de una IPS cliente. Se tomó como criterios el número de novedades que presentan cada una de los clientes remitores y sus características, además del tiempo de oportunidad entre la toma de la imagen radiológica y la solicitud de lectura.

En principio, se decidió seleccionar dos clientes remitores, no obstante por la contingencia sanitaria no se lograron realizar visitas y sólo se escogió una de las dos IPS candidatas. Se obtuvo respuesta favorable para participar en este trabajo.

3.1. Recopilación de datos

La base de datos fue suministrada por la plataforma de PACS de *Avantage Health Systems SAS* que permite exportar información de su base de datos en una tabla de Excel filtrada por fecha de estudio, institución, modalidad diagnóstica y estatus del estudio (Figura (3-1)). Estas variables serán explicadas a continuación:

The screenshot shows a web interface titled "Radiología Digital SAS". At the top right, there are two buttons: "Atrás" and "Salir". Below them is a link that says "Generar reporte en Excel". The main form area contains several input fields and dropdown menus:

- Fecha del estudio:** Two input boxes labeled "Desde" and "Hasta", both with the format "(dd/mm/yyyy)".
- Institución:** A dropdown menu with the text "Seleccione una Institución".
- Modalidad diagnóstica:** A dropdown menu with the text "Seleccione una modalidad de estudio".
- Estatus del estudio:** A dropdown menu with the text "Seleccione el estado del estudio".

At the bottom of the form, there is a button labeled "Exportar a Excel".

Figura 3-1: Interfaz de PACS de Avantage Health Systems SAS para descarga de información.

1. **Fecha de estudio:** Permite elegir la ventana de tiempo que se quiere descargar, sin embargo, el tiempo de descarga es proporcional a la amplitud del rango que se desea descargar y por la inestabilidad de la red fue necesario descargar ventanas de tiempo de 15 días.
2. **Institución:** En ésta opción se selecciona el nombre de la IPS cliente ó si no se selecciona ninguno este descargará la información de todas las IPS. En este caso se optó por la segunda opción, ya que los datos se filtrarían mas adelante en Excel.
3. **Modalidad diagnóstica:** Es la técnica o modalidad usada para la obtención de la imagen radiológica, estos atributos están definidos por el equipo y el tipo de archivo DICOM [42] (CR, CT, DX, DX789, ECO, MG, MR, OT, PR, RF, SR, US y XA). En este caso solo se puede seleccionar una modalidad por descarga, ya que los estudios de rayos X se representan con varios atributos. Con cada uno de ellos fue necesario realizar una descarga aparte por cada modalidad de rayos X convencional.
4. **Estatus del estudio:** En ésta opción se selecciona en que estado del estudio se quiere descargar (sin solicitud de informe, visualizado, informado, pendiente, novedad). Solo permite una opción. En este caso solo fue necesario usar la opción de informado (estado que indica que el estudio ya terminó todos los procesos) para el cálculo de tiempo de oportunidad y la opción de novedades.

También el PACS cuenta con una pantalla de *worklist* (Figura 3-2) que permite filtrar los estudios por modalidad de estudio, rango de fechas, IPS cliente, estado del estudio y información del paciente. No permite descarga de datos de varios estudios, pero es una herramienta útil para visualizar cada examen tomado y número de imágenes de los mismos, dato que no es proporcionado en la descarga de Excel.

Figura 3-2: Interfaz del worklist del PACS de Advantage Health Systems SAS

El visor del PACS (Figura 3-3) es una herramienta que permite visualizar las imágenes que han sido tomadas por el cliente, posee herramientas útiles para que el médico radiólogo realice su diagnóstico (parte superior de la Figura 3-3). Este visor es usado mas adelante para verificar la calidad de las imágenes e identificar el número de imágenes por tipo de estudio.



Figura 3-3: Visualización de estudios

Esta recopilación de datos es uno de los pasos más importantes porque a partir de ellos se tomará la información que permitirá analizar y finalmente seleccionar la IPS más adecuada para modelar y optimizar.

3.2. Cálculo de indicadores de oportunidad

En [2], se creó una herramienta software que permite medir de forma semi-automática el indicador de oportunidad en el proceso I+D+R, un ejemplo de la ficha técnica de este indicador se encuentra en el anterior capítulo Figura (2-1). El software calcula el indicador mediante medidas de tendencia central (media aritmética o mediana dependiendo la distribución de los datos).

Con esta herramienta se logró identificar retrasos significativos de los diferentes subprocesos. De los diferentes subprocesos, se eligió optimizar la etapa de adquisición de imágenes radiológicas, que además de verse afectada por los resultados en tiempo de oportunidad, es el comienzo de todo el proceso y al tener una mala praxis genera un efecto acumulativo que entorpece los procesos posteriores.

Se calculó el indicador de oportunidad relacionado con la etapa de *imaging*, el cual indica el tiempo desde la toma de la imagen radiológica hasta la solicitud de lectura e interpretación. Se eligió una ventana de tiempo de seis meses, correspondientes al segundo semestre de año 2019, para las IPS clientes ubicadas en la ciudad de Bogotá, considerando que en esta ciudad se encuentra el mayor volumen de imágenes solicitadas para lectura e interpretación.

En la Figura del anexo (7-2) se muestran las gráficas del tiempo de oportunidad que se calculó en de cada una de las IPS para cada mes del rango de tiempo elegido. En la Tabla (3-1), se presentan los tiempos de oportunidad promedio en horas y minutos.

Tabla 3-1: Tiempo promedio de oportunidad de las IPS en la ventana de seis meses

Nombre de la IPS	Tiempo promedio de oportunidad (h)	Tiempo promedio de oportunidad (min)
Hospital San Blas	1,22	73.2
Hospital Centro Oriente	1,51	90.6
Hospital la Victoria	0,51	30.6
Medicentro	7,25	435.0
Miocardio	1,31	78.6
Miocardio urgencias	0,36	21.6
I.M.I.	0,43	25.8
Santa Clara	0,67	40.2

Tomando este criterio, se tomaron como principales IPS candidatas a: Medicentro, Hospital Centro Oriente y Miocardio, que como se observa en las gráficas de la Figura (7-2) y el tiempo promedio de oportunidad de la Tabla (3-1), poseen los tiempo más críticos de oportunidad.

Por lo general, el procedimiento completo de un examen de rayos X suele tener una duración de 15 a 20 minutos [43], sin embargo, en la Tabla (3-1), se puede observar que ninguna de las IPS cliente se encuentra en este rango.

3.3. Novedades

Cuando el médico radiólogo manifiesta no poder realizar la lectura de una solicitud por diferentes motivos, este procede a reportar con las razones por las cuales no se concluye la lectura. Por lo anterior, la solicitud entra en otro proceso que, dependiendo del motivo de la novedad, procede de forma distinta para resolver el inconveniente y responder a la solicitud. Por ejemplo, el proceso para resolver una novedad relacionada con una solicitud duplicada será diferente al de una novedad relacionada con la calidad de la imagen y que requiera de

una nueva toma para realizar la interpretación.

Independientemente del tipo de novedad, se genera un retraso en la entrega del informe médico y en algunos casos la única solución es realizar nuevamente la toma del examen, generando un desplazamiento nuevamente del paciente al hospital hasta las implicaciones que una nueva dosis de radiación puede causar en su salud.

3.3.1. Categorización de novedades

El mayor inconveniente que se presenta al momento de analizar los reportes con novedades es la falta de estandarización. En la Figura (3-4), se muestra un ejemplo de cómo se reportan las novedades.

Informe
ESTUDIO NO APTO PARA LA LECTURA. PRESENTA ARTIFICIOS DE MOVIMIENTO Y LA LUZ DE LA VíA AÉREA NO ESTÁ VISUALIZADA. GRACIAS.
Favor revisar este paciente ya que tiene una fractura en un dedo pero al encontrarse sin marcación no es posible dar lectura. Gracias.
El estudio no se puede leer por que la imagen está velada.
Se envia novedad, la dra solicita verificar lateralidad, ya que el corazon se encuentra a la derecha.
Favor revisar este paciente ya que solo cuenta con proyección LATERAL y no puede ser leído de esta forma. Gracias

Figura 3-4: Reporte de novedades

Para identificar cuales de ellas pueden tener su origen o estar relacionadas con los procesos de adquisición de la imagen radiológica, en consenso con la empresa y después de varias reuniones con un grupo interdisciplinar, se resuelve realizar una categorización de las mismas que se cuantificaron con las siguientes categorías:

1. **Solicitud duplicada:** El médico radiólogo manifiesta que el estudio se encuentra dos o más veces solicitado para lectura e interpretación.
2. **Falta solicitud de estudio comparativo:** En algunos exámenes cuando se requiere estudiar un miembro afectado es necesaria la toma del otro miembro con fines comparativos, es ente caso solo se realiza solicitud de uno de los dos miembros. También se reporta como “falta de lateralidad”.
3. **No informa:** El radiólogo no da indicios de los motivos por qué se reporta novedad.
4. **No cargan:** Las imágenes no se pueden ni visualizar ni descargar del PACS.
5. **Confirmar marcación:** Cuando se realiza la toma de la imagen radiológica es necesario marcar que lado del paciente es el derecho e izquierdo, también aplica a las extremidades. Se reporta esta novedad cuando no se encuentra marcada esta lateralidad o hay dudas de correspondencia de esta.

6. **Técnicamente limitado:** Se reporta que la técnica con la que se realizó el estudio no se tomó de la forma correcta, es decir, existen estructuras sobrepuestas. También se reporta cuando la imagen velada, rotada, muy oscura, muy clara, basculada (desnivelada), con artificios en movimiento o con alta densidad de yeso.
7. **Faltan datos:** El radiólogo no concluye la lectura porque los datos clínicos suministrados no fueron proporcionados o no son suficientes (edad, sexo, requiere historial, etc.).
8. **Protocolo incompleto:** No se suministran todas las proyecciones que requiere el estudio.
9. **Imagen recortada:** No se logra visualizar completamente una o varias imágenes.
10. **Imagen no corresponde con solicitud:** La solicitud presenta un tipo diferente de estudio que el que se encuentra en el PACS.
11. **Otro:** No corresponde a ninguna de las categorías.

En la Figura (3-5) se presenta una gráfica del porcentaje de novedades respecto a la categorización de las IPS clientes ubicadas en la ciudad de Bogotá, esta categorización corresponde

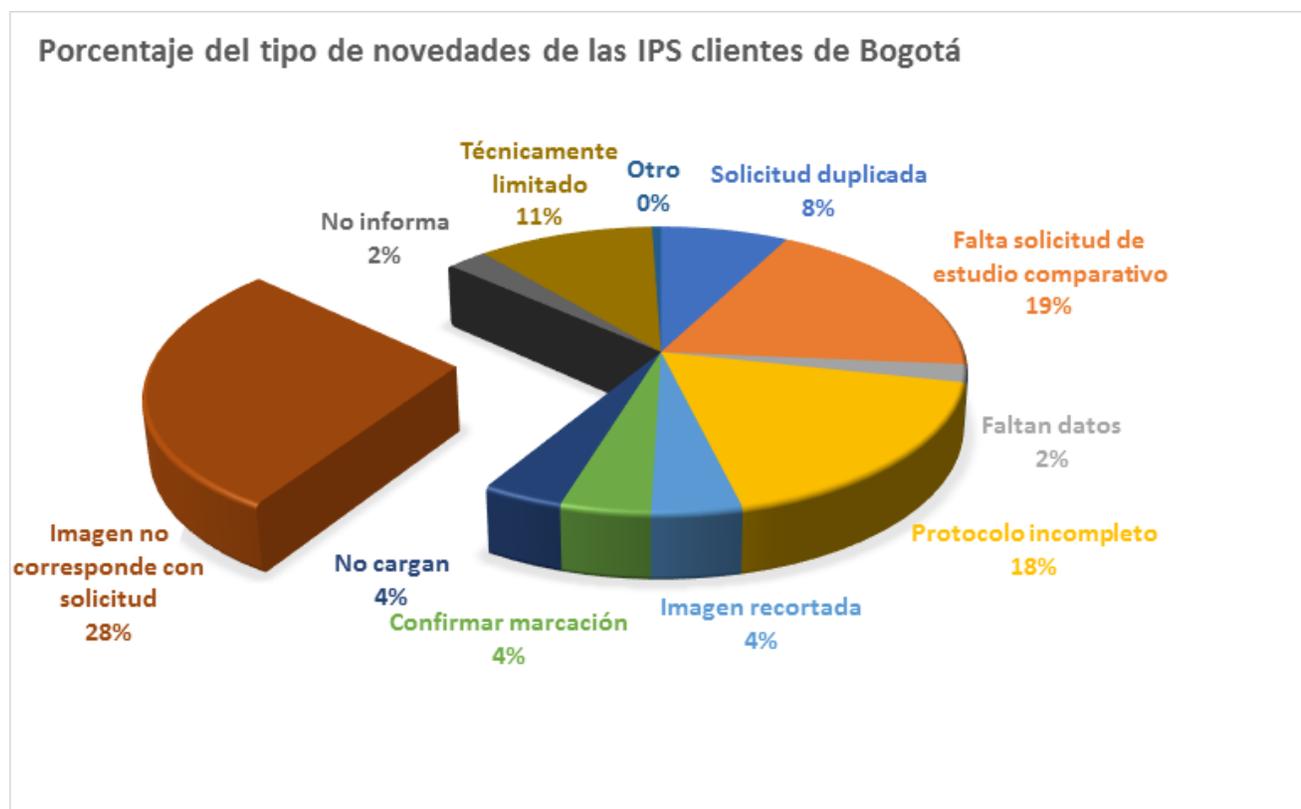


Figura 3-5: Porcentaje de tipo de novedades de las IPS cliente situadas en la ciudad de Bogotá en la ventana de tiempo de seis meses

a la ventana de seis meses que contiene 747 novedades. En ella se puede observar que el mayor porcentaje lo lidera la categoría de “Imagen no corresponde con solicitud” con un porcentaje que corresponde a casi un tercio del total.

Sin embargo, para verificar que esta cifra corresponde a un fenómeno constante, se realizó la gráfica de la Figura (3-6); esta confirmó una homogeneidad de los datos donde la categoría no es menor a 25 novedades en alguno de los meses.

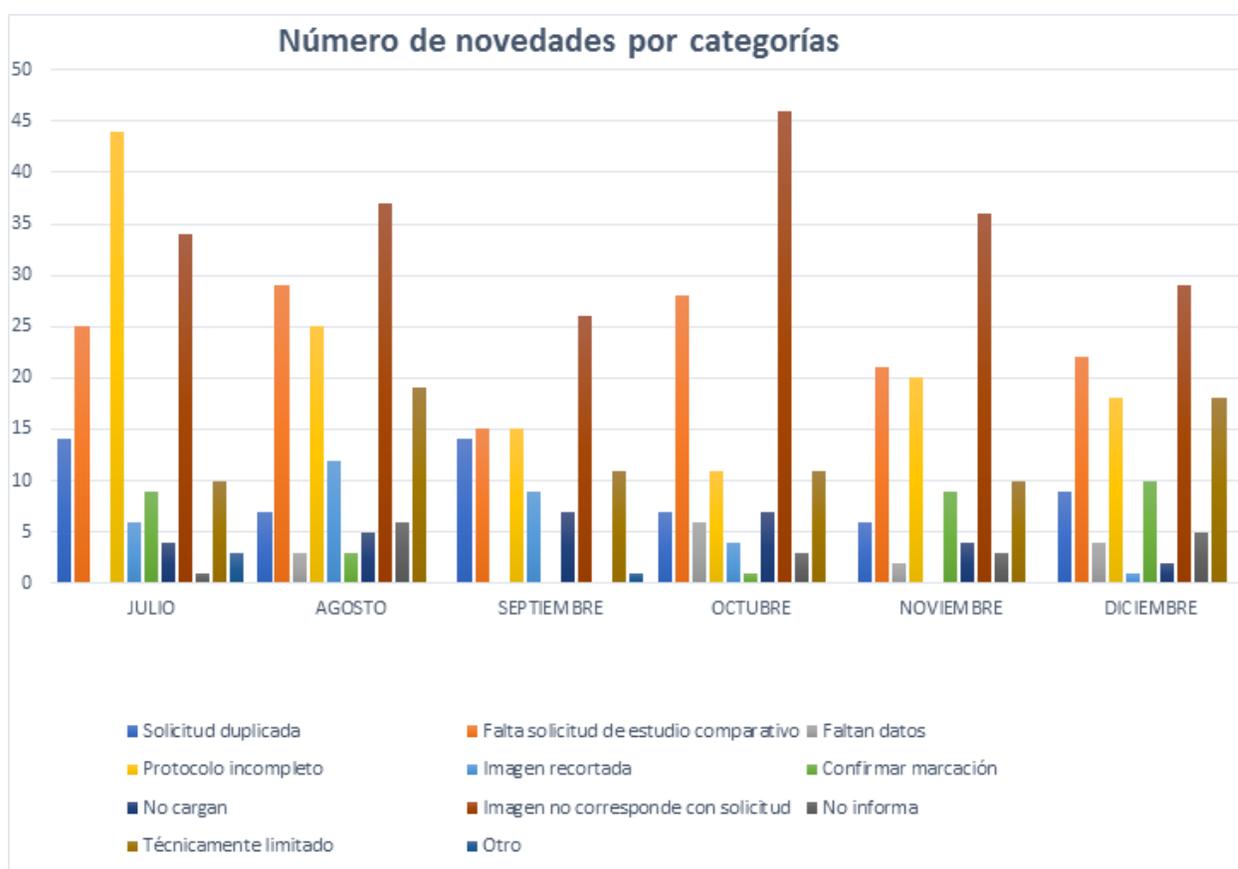


Figura 3-6: Cantidad de novedades por clasificación de las IPS cliente situadas en la ciudad de Bogotá en la ventana de tiempo de seis meses

La categoría “Imagen no corresponde con solicitud” esta relacionada con la actividad de solicitud de lectura, más específicamente cuando el tecnólogo en radiología realiza el diligenciamiento de la información en el PACS, aunque la causa también puede estar asociada a una falta de atención o confusión por parte del mismo, se sugiere una revisión de la interfaz que permita la confirmación de los datos y que el tecnólogo realice una segunda revisión.

3.3.2. Cálculo de novedades

Para cuantificar el número de novedades que se presentaron en cada una de las IPS cliente, se descarga de forma similar los datos del PACS en la misma ventana de tiempo, con la excepción de que el estatus del estudio es “Novedad”. Se filtran los datos usando Excel como herramienta de depuración dejando solo los clientes de la ciudad de Bogotá. Se graficaron el porcentaje de novedades respecto al porcentaje de estudios informados en cada uno de los meses que se muestra en la Figura del anexo (7-1).

A continuación en la Tabla (3-2) se presenta el resumen del anexo (7-1), en esta se expone el porcentaje promedio de novedades por mes respecto al porcentaje de estudios realizados (informados).

Tabla 3-2: Porcentaje promedio de novedades de las IPS en la ventana de seis meses

Nombre de la IPS	Porcentaje promedio de novedades
Hospital San Blas	1.30 %
Hospital Centro Oriente	0.94 %
Hospital la Victoria	1.32 %
Medicentro	0.90 %
Miocardio	0.20 %
Miocardio urgencias	0.54 %
I.M.I.	2.21 %
Santa Clara	0.82 %

Para este criterio se seleccionaron las tres IPS cliente con mayor porcentaje de novedades: 2.21 %, 1.32 % y 1.30 %, los cuales corresponden al I.M.I (Instituto Materno Infantil), el Hospital la Victoria y el Hospital San Blas, respectivamente.

3.4. Selección de IPS

Para el criterio del tiempo de oportunidad, debido a la gran diferencia en tiempo que presenta la IPS cliente Medicentro (con un tiempo promedio de 7.25 horas) se tomó como la primera candidata frente a las demás (Figura del Anexo (7-2), Tabla (3-1)) y fue elegida para optimización. Sin embargo, no se obtuvo una respuesta de colaboración de parte de este cliente.

Para el criterio de novedades, se revisaron el tipo de novedades de cada una de las IPS seleccionadas por este criterio en la ventana de tiempo elegida. En la Figura (3-7), el I.M.I

es el cliente con mayor porcentaje de novedades relacionadas a la categoría “Técnicamente limitado”. Con base en esto se revisaron una parte de las imágenes de la novedades con el visor del PACS (Figura 3-3); luego de una reunión y teniendo en cuenta la naturaleza de las novedades y opinión de profesionales en el tema, se llegó a la conclusión que parte importante de la novedades podrían estar relacionadas al funcionamiento del equipo y no por los procesos operativos de los tecnólogos; por lo tanto se descartó este candidato.

Porcentaje del tipo de novedades del I.M.I.

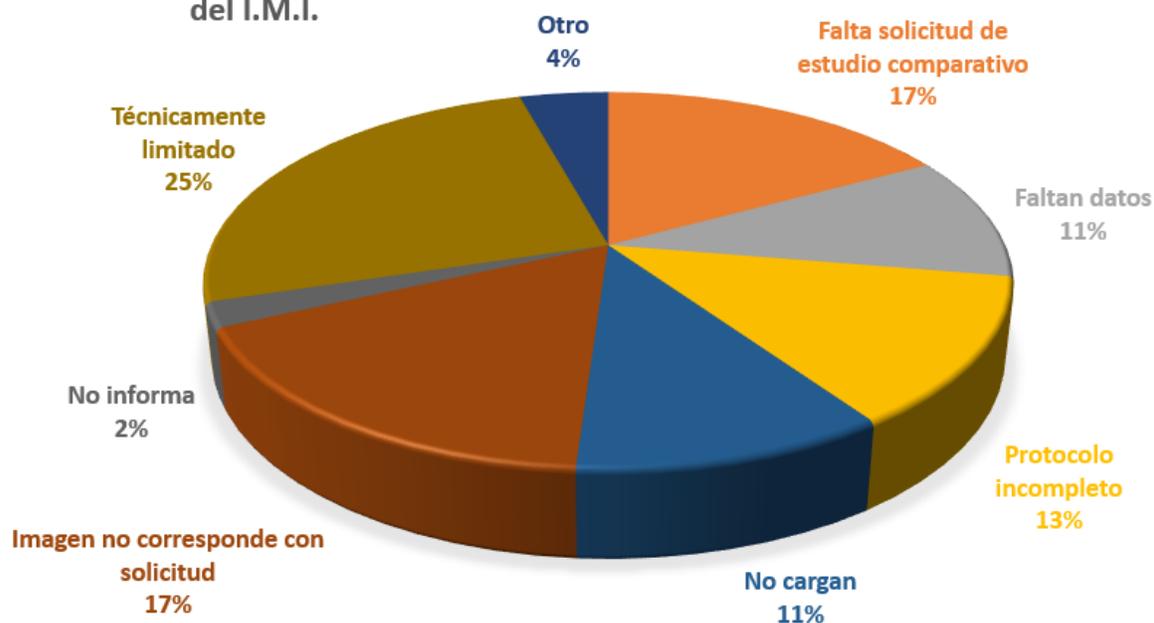


Figura 3-7: Porcentaje de tipo de novedades del cliente I.M.I. de la ventana de tiempo de seis meses

Para definir con qué IPS se iba a trabajar; junto con Radiología Digital S.A.S., se acordó elaborar una gráfica que permitiera realizar un análisis comparativo de los candidatos más idóneos para la investigación, los cuales eran el Hospital La Victoria y el Hospital San Blas (Figura 3-8).

Después de varias reuniones en las que se utilizó como principal criterio de elección el porcentaje de novedades que presentaba cada hospital, se eligió al Hospital la Victoria, ya que, aunque este posee una menor cantidad de novedades a comparación del hospital San Blas, la relación establecida respecto al número de informes es más crítica y presenta mayor homogeneidad en tipos de novedades, esto quiere decir, que existe una mayor probabilidad de que las novedades en el Hospital La Victoria no sean generadas por causas aleatorias y circunstanciales, sino que sean producto de un proceso uniforme y reiterativo, tal como se

evidencia en la Figura (3-8).

Además, el Hospital la Victoria demostró una cooperación en el proyecto, por lo que se decidió que sobre esta IPS se realizaría la optimización.

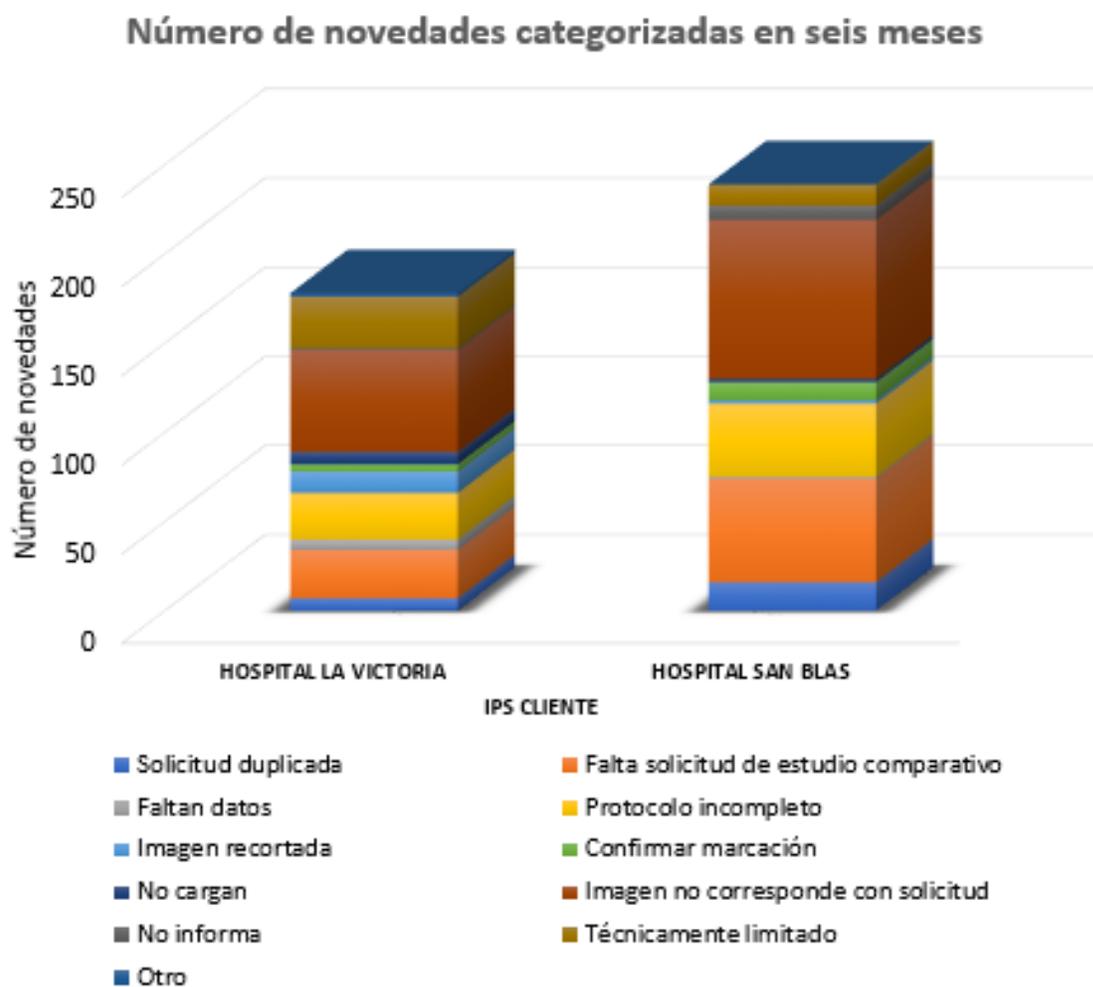


Figura 3-8: Gráfica de comparación de número y tipo de novedad de la ventana de tiempo de seis meses

4 Simulación del proceso de adquisición

En este capítulo se abordará todo lo relacionado con el diseño de simulación del modelo actual de la IPS cliente Hospital la Victoria con base en redes de Petri. En principio se planteó tomar los datos necesarios para esta etapa realizando visitas a la IPS , sin embargo, dadas las circunstancias de contingencia sanitaria generadas por el contagio de COVID-19 en la ciudad, se optó por obtener esta información de encuestas y reuniones en videollamada.

4.1. ¿Qué información se requiere para realizar el modelo?

Como se pudo observar en el capítulo 2, las transiciones representan estados en ejecución (acciones y eventos), para este componente se requiere obtener información acerca de las actividades, el orden en el que se realizan y el tiempo que toma cada una en el proceso de adquisición de imagen. Por ejemplo de ello es la Figura (4-1) se observa muestra que la transición relacionada a la actividad de “Digitalizando y arreglando imagen”, y por supuesto, esta actividad tiene un tiempo asociado de realización, en estas simulaciones este tiempo se manejará en segundos.

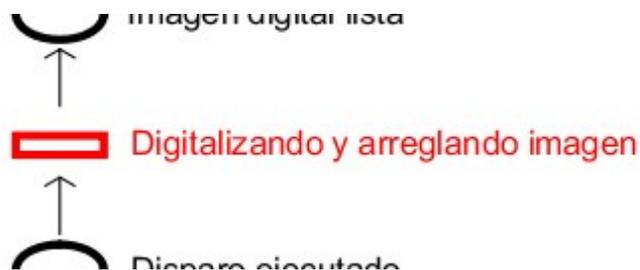


Figura 4-1: Ejemplo de transición del proceso de adquisición

Para las plazas o lugares es necesario tener en cuenta las personas, lugares y procesos culminados. Y los tokens el número de los mismos que interactúan en el proceso. por ejemplo, en la Figura (4-2) se representan los pacientes en consulta externa, y posee dieciséis tokens, es decir, en ese momento de la simulación hay dieciséis pacientes de consulta externa.

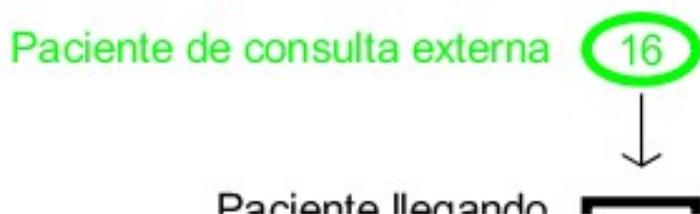


Figura 4-2: Ejemplo de plaza y tokens del proceso de adquisición

Es importante también tener en cuenta el número de proyecciones y población que atiende el hospital, ya que el tiempo de ejecución de algunas actividades dependen de estos factores. Para esto se realizó un análisis epidemiológico y de estudios frecuentes.

Por ultimo, se especifica que se eligió modelar una jornada de trabajo o turno (cuatro horas) de consulta externa.

4.2. Modelización del modelo de adquisición

Para realizar el modelo, el primer paso fue la identificación de cada una de las acciones o actividades realizadas desde que el paciente llega a la sala de espera del servicio hasta que culmina su examen y se retira de él. Para esto se recurrió tanto a la opinión de personal de Radiología Digital S.A.S. con experiencia en los procesos de adquisición de la imagen radiológica, como a la opinión de los tecnólogos del Hospital la Victoria.

Para la participación de los tecnólogos fue necesaria la elaboración de una encuesta en un formato de Google Forms que fuera respondida de forma virtual y anónima por los 5 tecnólogos del servicio de radiología (Figura del anexo 7-5), esta encuesta se ejecuto gracias al contacto que realizó Radiología Digital S.A.S. con la coordinación de imágenes diagnósticas del hospital.

En la Figura (4-3), se observan las respuestas de cada uno de los tecnólogos a la pregunta relacionada con la identificación de las actividades y el orden en el que se realizan para la toma de la imagen radiológica. A pesar que las respuestas son muy heterogéneas (las actividades similares poseen el mismo color). Luego de varias reuniones con la gerencia de la empresa y con la coordinación del servicio de imágenes diagnosticas del hospital junto con la encuesta respondida por los tecnólogos, se logró identificar el procedimiento de la siguiente forma:

Describa los pasos que usted considera que se llevan a cabo para la toma del estudio en el servicio de radiología en el Hospital la Victoria				
Tecnólogo 1	Tecnólogo 2	Tecnólogo 3	Tecnólogo 4	Tecnólogo 5
Recepción orden médica diligenciamiento de datos cambio de paciente posicionamiento paciente toma estudio digitalización estudio envío estudio solicitud estudio.	Recepción de documentos verificación Ingreso de paciente y preparación para toma de examen Ingreso de datos de paciente en el equipo de rx Toma de estudio, Adquisición de imágenes Procesamiento de imágenes y control de calidad Envío de examen a plataforma Anuncio al paciente que se puede vestir e irse, dando indicaciones sobre resultados Solicitud de estudio en sistema	1 recepción de orden 2 verificación de datos con el paciente 3 Presentación ante el paciente y explicarle qué procedimiento se le va a realizar 4 lavado de manos 5 Desinfección de la sala de rx 6 asepsia 7 verificar la calidad del estudio 8 maquillar y enviar imágenes 9 confirmar en dinámica 10 ingresar a Excel 11 ingresar a avantage 12 lavado de manos	Presentación. comprobación de datos del paciente y orden médica. explicación del examen a realizar. aclaración de dudas. preparación o retiro de prendas u objetos por el paciente. atención y toma de imágenes. Verificación de imágenes tomadas y envío de estudio. Despacho del paciente aclarando dudas de entrega y paso a seguir después de la toma de sus exámenes. Solicitud de lectura del examen.	Recepción de la orden Presentación Verificar datos Posiciones paciente Darle información Técnicas del equipo Maquillar estudio Confirmar dinámica Excel Avantage Retirar paciente del servicio

Figura 4-3: Encuesta a tecnólogos del Hospital la Victoria sobre procesos

- El agendamiento para la toma de rayos X en este hospital es de cada quince minutos, es decir, es el tiempo disponible con el que cuenta el tecnólogo para realizar todo el procedimiento de adquisición. Dado que los turnos son de cuatro horas, la cantidad máxima de pacientes que se pueden atender por turno es de dieciséis.

- A la hora de la cita, el paciente se dirige al área de rayos X, el tecnólogo realiza el ingreso del paciente y se presenta, el paciente le entrega los documentos necesarios para la toma del examen: documentos de facturación, orden médica y consentimiento informado (este documento solo es diligenciado si la paciente tiene sospecha de estado de embarazo y no en todos los pacientes como es el deber ser), se verifican los datos y se confirma asistencia.
- El tecnólogo ingresa los datos demográficos del paciente, edad, sexo, contextura entre otros.
- Dentro del servicio se encuentra un área privada de vestier, dependiendo el tipo de examen y si el tecnólogo lo determina, le solicita al paciente que se retire algunas prendas o accesorios que podrían llegar a interferir en la adquisición de la imagen, también si se requiere guía al paciente para que se coloque los elementos de radioprotección.
- El tecnólogo configura el equipo y ubica al paciente, le pide que mantenga una postura y le indica como manejar su respiración, este proceso se repite de acuerdo al número de proyecciones que se requieran. Luego el tecnólogo se dirige al área protegida de la radiación ionizante para configurar los parámetros del equipo de rayos X (kilovoltaje (kV) y miliamperaje (mA)) y realizar el disparo.
- El tecnólogo se dirige al área de digitalización, donde la placa radiológica sera digitalizada, se verifica la calidad de las imágenes y realiza la marcación, es decir, indicar cual es el lado derecho o izquierdo del paciente y recorta las imágenes para así finalizar el estudio. Este proceso se le conoce como pos-procesamiento o “maquillaje” de imágenes.
- Se dirige nuevamente hacia el paciente, le indica el retiro de los elementos de radioprotección y la colocación nuevamente de sus prendas y accesorios, le da las indicaciones sobre como reclamar los resultados y retira al paciente del servicio.
- Finalmente el tecnólogo llena el formulario de solicitud de lectura en el PACS de *Avantage Health System*.

Tener en cuenta las siguientes condiciones: para el servicio de rayos X, el Hospital la Victoria cuenta con tres turnos de cuatro horas cada uno. En el turno de la mañana y el de la tarde cuenta con dos tecnólogos, uno de ellos se encarga del equipo fijo (para citas con agendamiento de consulta externa) y el otro esta en rotación con el equipo portátil para servicios de urgencia. En el turno de la noche debido al bajo flujo de pacientes, solo cuenta con un tecnólogo que se encarga tanto del equipo fijo como del portátil.

Junto con Radiología Digital S.A.S. se acordó optimizar el procedimiento que realiza el tecnólogo de la jornada mañana o tarde, encargado de equipo fijo, es decir, solo de los pa-

cientes que tienen cita.

Fueron nueve las actividades que quedaron definidas y están descritas en la Tabla (4-1)

Tabla 4-1: Descripción de las actividades del proceso de adquisición de imagen de rayos X del Hospital la Victoria

Procesos	Descripción
Paciente llegando	Tiempo sobre el cual se hace el agendamiento de la cita para la toma del estudio. En el caso del Hospital La Victoria este es cada 15 minutos.
Recibiendo paciente	Solo cuando el tecnólogo se encuentre disponible y el paciente este en espera, es el tiempo desde que el paciente se dirige al servicio de rayos X desde la sala de espera hasta que el tecnólogo recibe los documentos (orden médica, facturación y consentimiento informado si es el caso) en la puerta del servicio.
Ingresando datos	Tiempo que tarda el tecnólogo en ingresar los datos demográficos en el digitalizador y seleccionar el protocolo a tomar.
Paciente cambiándose	Tiempo que tarda el paciente en retirarse las prendas y accesorios que el tecnólogo crea necesarias y ponerse el blindaje de radioprotección.
Posicionando el paciente	Tiempo que tarda el tecnólogo acomodando el paciente de acuerdo a la proyección a tomar, le pide al paciente mantener la posición y en caso de ser necesario le pide control de su respiración.
Ejecutando disparo	Tiempo que tarda tecnólogo en realizar la configuración técnica de los parámetros (Kv y mA) y en realizar el disparo.
Digitalizando y arreglando imagen	Tiempo que le toma al tecnólogo digitalizar cada una de las imágenes y una vez se encuentran en el sistema arreglar, recortar y realizar marcación de las mismas.
Finalizando estudio	Tiempo desde que el tecnólogo termina de maquillar las imágenes hasta que el paciente termina de cambiarse, el tecnólogo le explica como reclamar los resultados del examen y el paciente se retira del servicio.
Solicitando lectura	Tiempo que el tecnólogo tarda en diligenciar el formulario de las imágenes y solicitud de lectura del estudio y finaliza cuando el estudio sube en el PACS Advantage. Healt System.

4.2.1. Adquisición de tiempos

Luego de concretar las actividades del proceso de adquisición, es necesario identificar el tiempo que cada una de ellas le toma al tecnólogo o al paciente; estos tiempos fueron proporcionados por los tecnólogos en la encuesta.

Se realizó un promedio de estos tiempos, y los resultados se presentan en la Tabla (4-2). En ella se presenta:

\bar{x} (s): Tiempo promedio de duración del proceso.

σ (s): Desviación estándar, que representa la variación de los datos.

%: Porcentaje que representa la variación de los datos.

Tabla 4-2: Tiempo de las transiciones de modelo actual del Hospital la Victoria

Procesos	\bar{x} (s)	\bar{x} (min)	σ (s)	%
Paciente llegando	900	15	0	0
Recibiendo paciente	126	2.1	29.39	23.33
Ingresando datos	144	2.4	61.19	42.49
Paciente cambiándose	264	4.4	127.80	48.41
Posicionando el paciente	204	3.4	81.36	39.88
Ejecutando disparo	60	1	0	0
Digitalizando y arreglando imagen	156	2.6	48.00	30.77
Finalizando estudio	240	4	75.89	31.62
Solicitando lectura	144	2.4	89.80	62.36
Tiempo total	2238	37.3	-	-

También se les pregunto a los tecnólogos por el tiempo que ellos consideran que pueden tardar en tomar un estudio (Figura 4-4).

El tiempo promedio que consideran los tecnólogos que pueden tomar un estudio esta entre los 14.4 minutos y 16 minutos, sin embargo, se debe tener en cuenta que tres de los cinco tecnólogos manifiestan que un estudio les puede tomar hasta en 20 minutos, es decir, puede que el examen tome 5 minutos más que el agendamiento y posiblemente generar un retraso en la atención de los siguientes pacientes.

¿Cuánto tiempo en promedio tarda en realizar un estudio, desde el ingreso del paciente al servicio hasta la solicitud de lectura?	
Tecnólogo 1	10 minutos.
Tecnólogo 2	10 minutos.
Tecnólogo 3	20 minutos.
Tecnólogo 4	12 a 20 minutos dependiendo condición clínica, colaboración o ayuda por el paciente.
Tecnólogo 5	20 minutos

Figura 4-4: Encuesta a tecnólogos del Hospital la Victoria sobre tiempo total promedio del estudio

4.3. Análisis epidemiológico de pacientes del Hospital la Victoria

La atención del paciente depende en buena parte de varios factores, entre los que se encuentra: edad, tipo de estudio, complejidad del paciente (movilidad, estado de conciencia, si tiene o no un acompañante...). En la encuesta también se le preguntó al tecnólogo por el estudio que consideran que es más complejos de realizar y el motivo (Figura 4-5).

¿Qué estudio(s) considera que es más difícil de tomar para conseguir imágenes con calidad?		¿Y por qué?
Tecnólogo 1	Atm, Tangencial de rotulas.	
Tecnólogo 2	Caderas de bebé.	Porque se mueven mucho.
Tecnólogo 3	Caderas para niños.	Falta de colaboración de acompañantes y paciente.
Tecnólogo 4	Los estudios de cara y cráneo, pacientes pediátricos, personas borrachas, accidentados y psiquiátricos.	
Tecnólogo 5	Caderas.	Porque las mamás no sostienen los niños.

Figura 4-5: Encuesta a tecnólogos del Hospital la Victoria sobre complejidad de estudios

Cuatro de los cinco tecnólogos coincidieron en que los pacientes que suelen ser más complejos son los pacientes pediátricos y tres de ellos en que el estudio más complejos es la radiología de caderas.

Las respuestas a la anterior pregunta permitió plantear la necesidad de investigar el tipo de población que atiende el hospital y el tipo de exámenes que solicita, para esto se realizó un estudio de los tipos de exámenes más frecuentes que se realizaron en la ventana del tiempo de seis meses y se estratificaron de acuerdo a los rangos de edad propuestos Ministerio de Salud para el estudio de la población según curso de la vida (DANE 2019).

En este capítulo se presentan los rangos de edad que podrían generar una mayor complejidad en la toma del examen (de 0 a 5 años y de 60 años o más), sin embargo, las gráficas de cada edad se encuentran en el anexo (7-3).

En la Figura (4-6), se presenta una gráfica que corresponde al número de estudios informados en el Hospital la Victoria de acuerdo a la estratificación de edad. Se aprecia que el mayor número de estudios informados pertenecen a adultos mayores (60 años o más). Esta población demanda una atención especial, en principio, el paciente requiere presentarse con un acompañante, en caso de no ser así y dependiendo la condición de movilidad del paciente, el tecnólogo realizará un esfuerzo adicional que precisa en algunos casos cambiar el paciente, ayudarlo a levantar y demás para realizar la toma de la imagen radiológica.

En la gráfica de la Figura (4-7) se presenta el porcentaje de estudios informados en el rango

de edad, se ella se observa que mas de la mitad de los pacientes corresponden a adultos mayores y pediátricos. Esta cifra es importante, ya que estos pacientes requieren de una mayor atención y acompañamiento que en algunos casos pueden generar un mayor tiempo en la toma del examen.

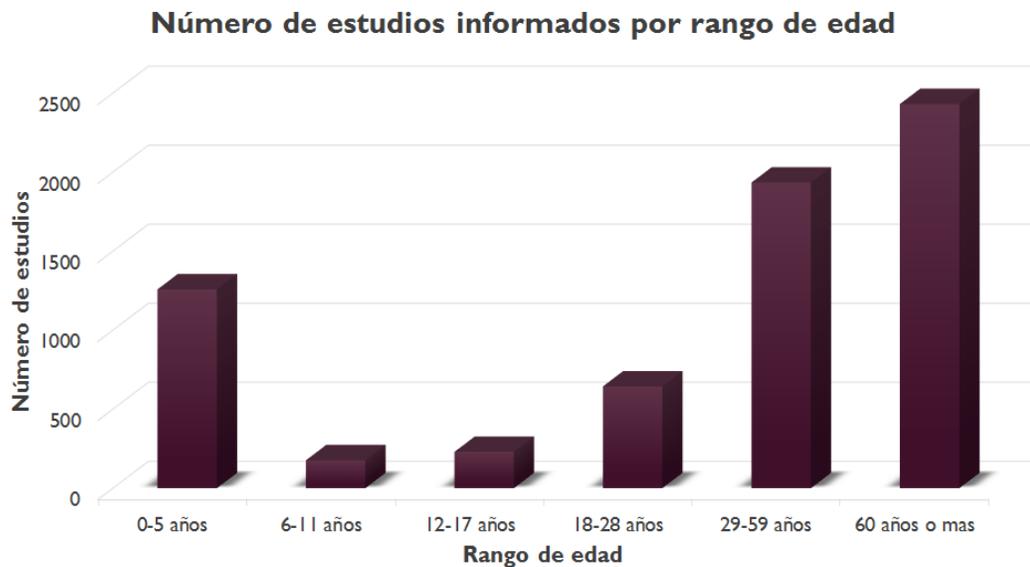


Figura 4-6: Número de estudios informados por rango de edad del Hospital la Victoria. Ventana de seis meses

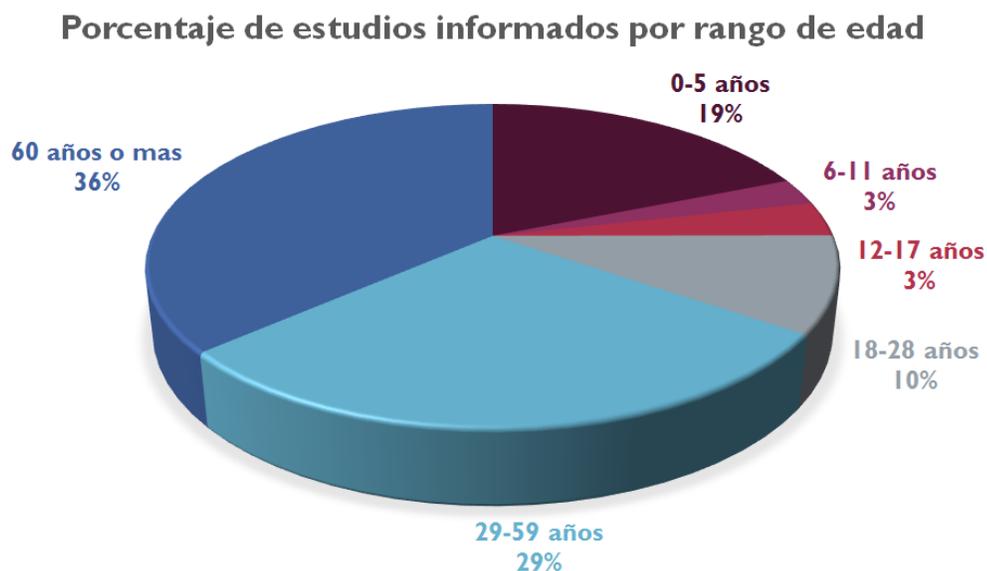


Figura 4-7: Porcentaje de estudios informados por rango de edad del Hospital la Victoria. Ventana de seis meses

La gráfica de la Figura (4-8) presenta el número y porcentaje del 98% de los estudios realizados a niños entre los 0 a 5 años de edad, el estudio con mayor frecuencia es el de radiografía de tórax y el que le sigue es la radiografía de cadera comparativa con un 30% sobre el total (estudio que los tecnólogos manifestaron de mayor complejidad).

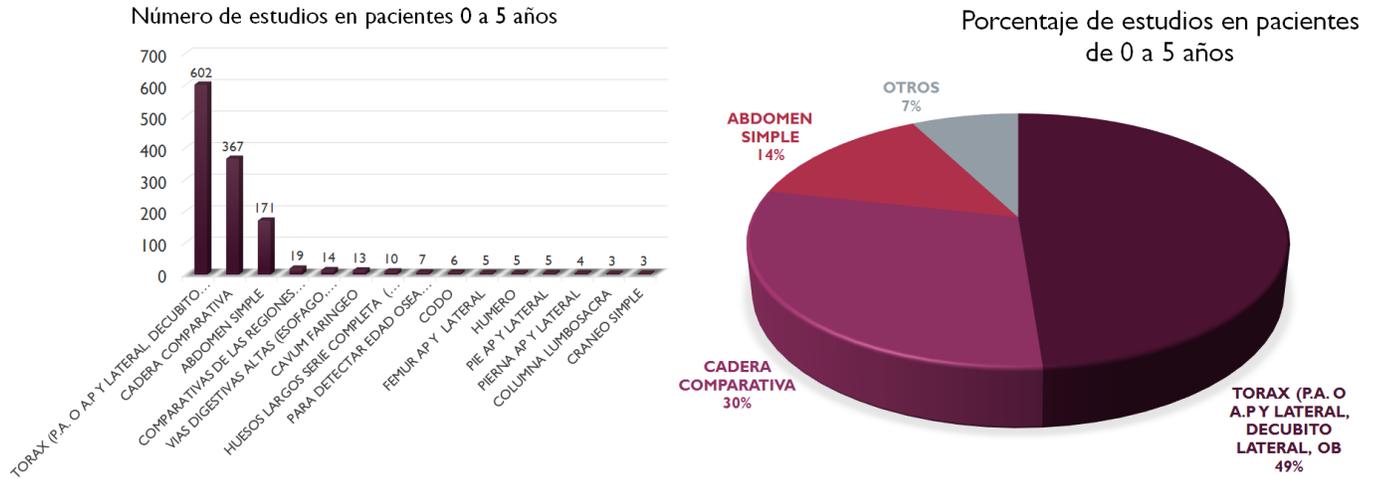


Figura 4-8: Número y porcentaje de estudios informados en pacientes de 0 a 5 años de edad

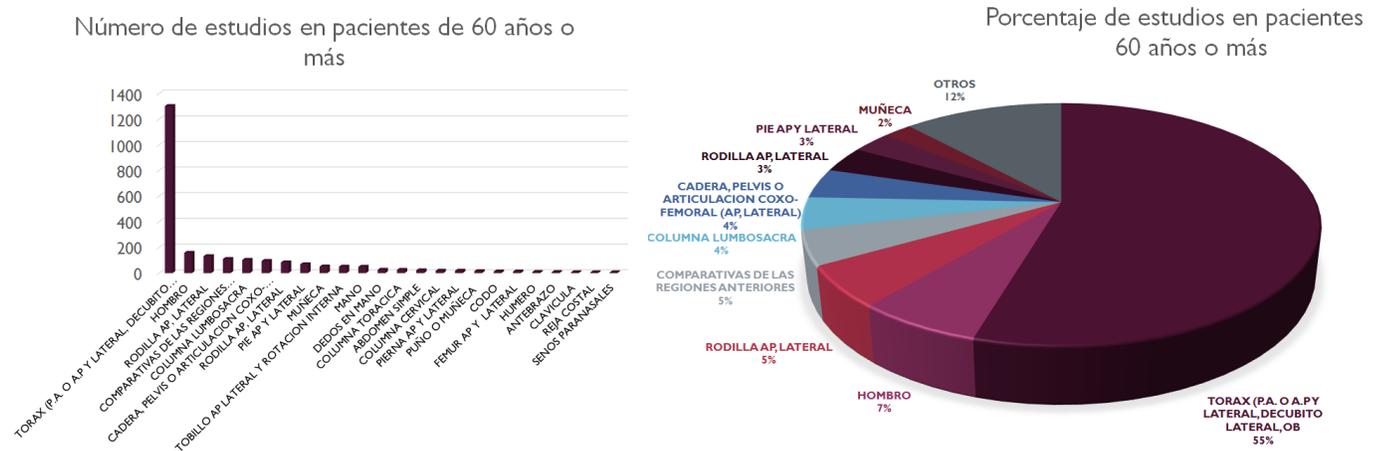


Figura 4-9: Número y porcentaje de estudios informados en pacientes de 60 años o más

Los pacientes de 60 años o más ocupan el mayor porcentaje de estudios informados, el estudio con mayor demanda es la radiografía de tórax, le sigue la de hombro y la de rodilla (Figura 4-9).

4.3.1. Cálculo de número de imágenes por estudio

Un factor importante que influye en el tiempo de la toma del examen depende del número de imágenes que se tomen. Por cada imagen que se tome los siguientes procesos deberán repetirse: posicionar al paciente, configurar parámetros del equipo (kilovoltaje (kV) y miliamperaje (mA)), realizar el disparo y la digitalización y arreglo de las imágenes.

El número de imágenes o proyecciones que se toman por examen depende del tipo de estudio, complejidad del paciente, posición corporal entre otros factores que dependen en mayor parte de las circunstancias de cada paciente (edad, condición física...).

En la Tabla (4-3) se muestra el número de imágenes y porcentaje al que corresponde por tipo de estudios informados en la ventana de seis meses, estos datos corresponden al servicio de consulta externa (citas con agendamiento) y representan el 92 % de los tipos de estudios que se toman en el hospital la Victoria. Para calcular el número de imágenes que se tomaban por tipo de estudio, se tomaron aleatoriamente 20 estudios por cada tipo de examen y se promedió este valor (cuarta columna).

Tabla 4-3: Cuantificación de imágenes Rayos X por estudio del Hospital la Victoria

Tipo de estudio	Número de estudios informados	Porcentaje de estudios informados $P(x_i)$	Frecuencia de imágenes por estudio x_i	$P(x_i)x_i$
Tórax (P.A. o A.P. y lateral, decúbito lateral, OB)	3303	49,47	1,25	0,62
Cadera comparativa	535	8,00	1,80	0,14
Rodilla AP, lateral	462	6,92	2,58	0,18
Hombro	280	4,19	2,15	0,09
Comparativas de las regiones anteriores	254	3,80	4,10	0,16
Abdomen simple	214	3,21	1,15	0,04
Columna lumbosacra	206	3,09	2,25	0,07
Pie AP y lateral	195	2,92	2,05	0,06
Mano	166	2,49	2,70	0,07
Tobillo ap lateral y rotación interna	151	2,26	2,40	0,05
Muñeca	128	1,92	2,00	0,04
Dedos en mano	101	1,51	2,55	0,04
Codo	71	1,06	2,15	0,02
Cavum faríngeo	50	0,75	2,60	0,02

Para calcular el número de imágenes por estudio es necesario tener en cuenta el porcentaje que representa cada examen sobre el total de estudios que solicita el hospital la Victoria. Para hallar este valor se usó la fórmula (4-1) que calcula el valor promedio de imágenes dependiendo la probabilidad del tipo de examen.

$$E(x) = \sum_{i=1}^n x_i P(x_i) \quad (4-1)$$

$$E(x) = 1,59$$

Este valor se tiene en cuenta en el tiempo de las siguientes transiciones: posicionando paciente, ejecutando disparo y digitalizando y arreglando imagen. Donde el tiempo de cada una de las transiciones es multiplicado por 1,59.

4.4. Simulación del modelo de adquisición

4.4.1. Índices de rendimiento

La herramienta PN Tool es también capaz de arrojar información de los índices de rendimiento tanto de las transiciones como de las plazas.

Índices de rendimiento de las transiciones:

- **Service Sum:** número total de disparos ejecutados.
- **Service Rate:** frecuencia promedio de disparos.
- **Service Distance:** tiempo promedio entre dos disparos sucesivos.
- **Service Time:** tiempo configurado de duración de la transición antes del disparo, también llamado retraso.
- **Utilization:** fracción de tiempo cuando la transición está ocupada.

Índices de rendimiento de las plazas:

- **Arrival Sum:** número total de tokens que ingresaron a la plaza.
- **Arrival Rate:** frecuencia promedio de ingreso de tokens a la plaza.
- **Arrival Distance:** tiempo promedio entre dos instantes sucesivos cuando ingresan los tokens a la plaza.
- **Throughput Sum:** número total de tokens que salieron de la plaza.

- **Throughput Rate:** frecuencia promedio de salida de tokens de la plaza.
- **Throughput Distance:** tiempo promedio entre la llegada de dos tokens sucesivos.
- **Waiting Time:** tiempo de espera promedio por token en la plaza.
- **Quene Length:** número promedio de tokens ponderados por tiempo.

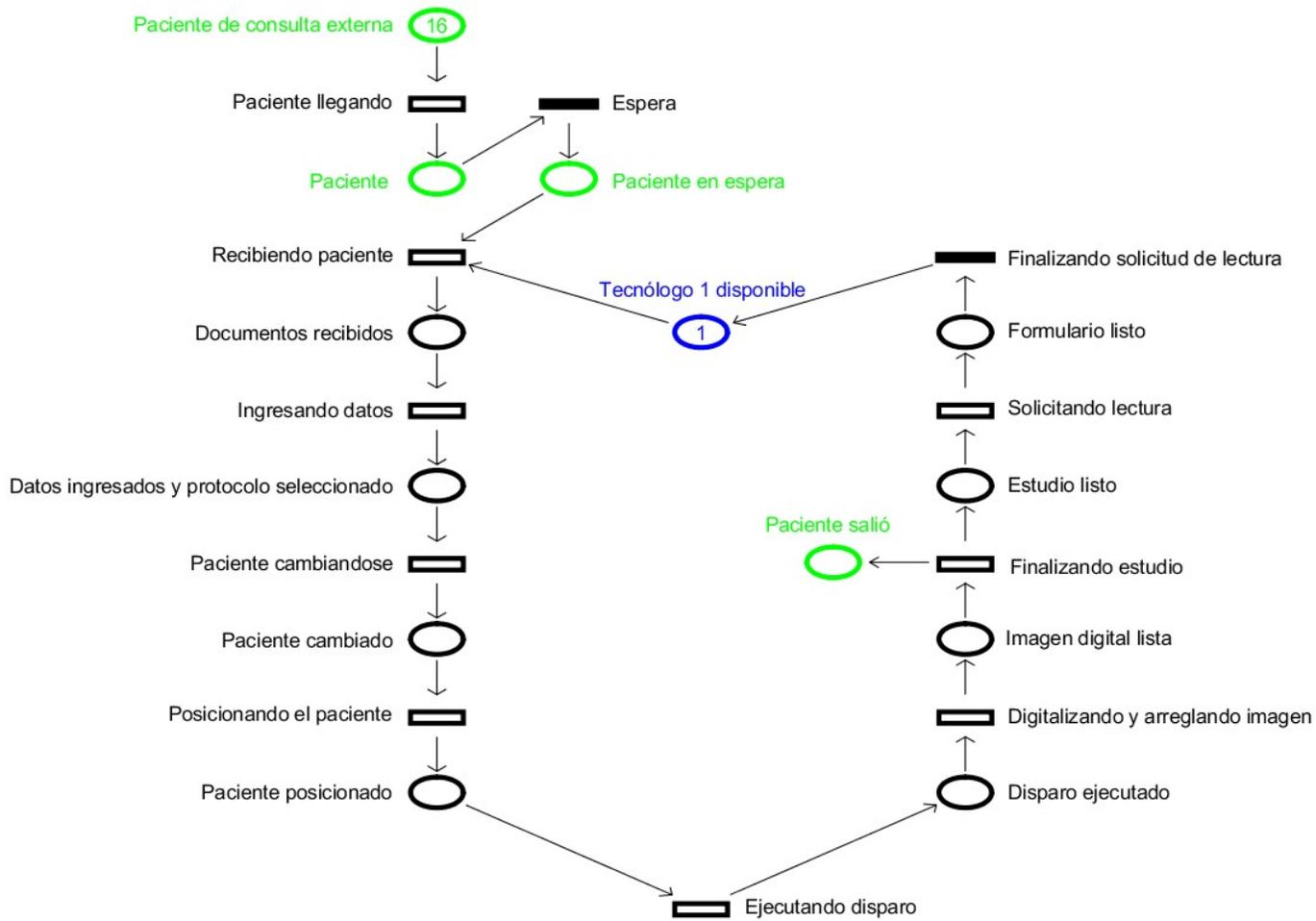


Figura 4-10: Modelo actual del Hospital la Victoria basado en redes de petri.

En la Figura (4-10) se presenta el modelo actual del procedimiento de toma de rayos X del hospital la Victoria, en la imagen se puede observar que en todas las transiciones exceptuando “Recibiendo paciente” tienen una sola condición de entrada (solo un arco ingresa), esto hace referencia a que los procesos se realizan de forma consecutiva. Las plazas relacionadas a personas que intervienen en el proceso se distinguen por color, las relacionadas al paciente son de color verde y las relacionadas a los tecnólogos de color azul.

Además de las transiciones descritas en la Tabla (4-1) para la simulación fue necesario agregar dos más: la transición “Espera” que cumple la función de generar una acumulación de pacientes en la siguiente plaza “Paciente en espera” y la transición “Finalizando solicitud de lectura” que permite la unión de la plazas “Formulario listo” y “Tecnólogo 1 disponible”; ambas transiciones están configuradas para dispararse en un tiempo de 0 segundos por lo que no generan ningún cambio en el procedimiento.

Los índices de rendimiento global se pueden consultar en cualquier tiempo de la simulación, es decir, solo se accede a esta herramienta cuando la simulación esta en modo de exploración. Cuando se acude a estos índices el programa genera una pagina de formato html donde se pueden visualizar. En esta pantalla también se muestra el nombre del modelo, el número de eventos generados y el tiempo de simulación hasta el momento. Al tiempo de simulación es necesario restarle 900 segundos del total de la simulación de la jornada, los cuales corresponden a los primeros quince minutos que el tecnólogo espera el paciente.

En la Figura (4-11) se visualizan los índices globales de rendimiento que corresponden a las transiciones de la simulación completa del turno de trabajo del hospital, que es de cuatro horas. Lo primero que se puede observar en esta imagen es la duración de la simulación, la cual es 25372.8 segundos, descontando los 900 segundos al tiempo total. Si se considera que en la jornada se atienden dieciséis pacientes, según el modelo el tiempo de atención por paciente es de 1585.8 segundos o 26.43 minutos.

Teniendo en cuenta que el tiempo de agendamiento es de 15 minutos, y el tiempo genera la simulación en la atención por paciente es de 26.53 minutos, se puede evidenciar un retraso en la atención de 11.53 minutos por paciente.

En estos índices también se puede observar que el mayor valor del índice de *Utilization* es 1 y corresponde a “Paciente llegando” que es la primera transición, esto debido a que esta transición se encuentra ocupada durante toda la simulación, el siguiente valor es de 0.96 que pertenece a la transición de “Espera” por su uso de acumulador. Las siguientes dos transiciones con un valor de 0.22522 y 0.20081 corresponden a “Posicionando paciente” y “Paciente cambiando”, respectivamente; son estas últimas las actividades la que mayor tiempo generan en todo el proceso.

Respecto a los índices globales de las plazas (Figura (4-12)) en evidente que índice *Waiting Time* posee su valor más crítico en la plaza “Paciente en espera” generado por el retraso en la atención expuesto con previamente, que además en el índice *Queue Length* llega a tener hasta 7.3198 pacientes en promedio.

Global Statistics: Transitions

Model:modelovictoria.xml

Events:176

Time:26272.8

Transition Name	Service Sum	Service Rate	Service Dist.	Service Time	Utilization
Paciente llegando	16	0.00060899	1642.05	900	1
Recibiendo paciente	16	0.00060899	1642.05	126	0.1323
Paciente cambiandose	16	0.00060899	1642.05	264	0.20081
Posicionando el paciente	16	0.00060899	1642.05	324.36	0.22522
Ejecutando disparo	16	0.00060899	1642.05	95.4	0.082155
Digitalizando y arreglando imagen	16	0.00060899	1642.05	248.04	0.16567
Finalizando estudio	16	0.00060899	1642.05	240	0.15164
Solicitando lectura	16	0.00060899	1642.05	144	0.087695
Ingresando datos	16	0.00060899	1642.05	144	0.13778
Espera	16	0.00060899	1642.05	0	0.96574
Finalizando solicitud de lectura	16	0.00060899	1642.05	0	0

Figura 4-11: Índices globales de desempeño de las transiciones del modelo actual del Hospital la Victoria.

Global Statistics: Places

Model:modelovictoria.xml

Events:176

Time:26272.8

Place Name	Arrival Sum	Arrival Rate	Arrival Dist.	Throughput Sum	Throughput Rate	Throughput Dist.	Waiting Time	Queue Length
Paciente de consulta externa	0	0	Inf	16	0.00060899	1642.05	900	0.5481
Paciente	16	0.00060899	1642.05	16	0.00060899	1642.05	0	0
Tecnólogo 1 disponible	16	0.00060899	1642.05	16	0.00060899	1642.05	182.25	0.11099
Documentos recibidos	16	0.00060899	1642.05	16	0.00060899	1642.05	144	0.087695
Paciente cambiado	16	0.00060899	1642.05	16	0.00060899	1642.05	324.36	0.19753
Paciente posicionado	16	0.00060899	1642.05	16	0.00060899	1642.05	95.4	0.058098
Disparo ejecutado	16	0.00060899	1642.05	16	0.00060899	1642.05	248.04	0.15106
Imagen digital lista	16	0.00060899	1642.05	16	0.00060899	1642.05	240	0.14616
Estudio listo	16	0.00060899	1642.05	16	0.00060899	1642.05	144	0.087695
Formulario listo	16	0.00060899	1642.05	16	0.00060899	1642.05	0	0
Datos ingresados y protocolo seleccionado	16	0.00060899	1642.05	16	0.00060899	1642.05	264	0.16077
Paciente en espera	16	0.00060899	1642.05	16	0.00060899	1642.05	12019.5	7.3198
Paciente salió	16	0.00060899	1642.05	0	0	Inf	Inf	7.3308

Figura 4-12: Índices globales de desempeño de las plazas del modelo actual del Hospital la Victoria.

En la gráfica de la Figura (4-13) se muestra el desempeño dinámico del índice de rendimiento *Queue Length* de la plaza “Paciente en espera”, en ella se puede observar que luego de 3687.6 segundos en la simulación se genera una acumulación de dos pacientes en espera, luego en los 5400 segundos logra acumular 3 pacientes hasta que a los 13500 segundos llega a tener hasta 7 pacientes en espera.

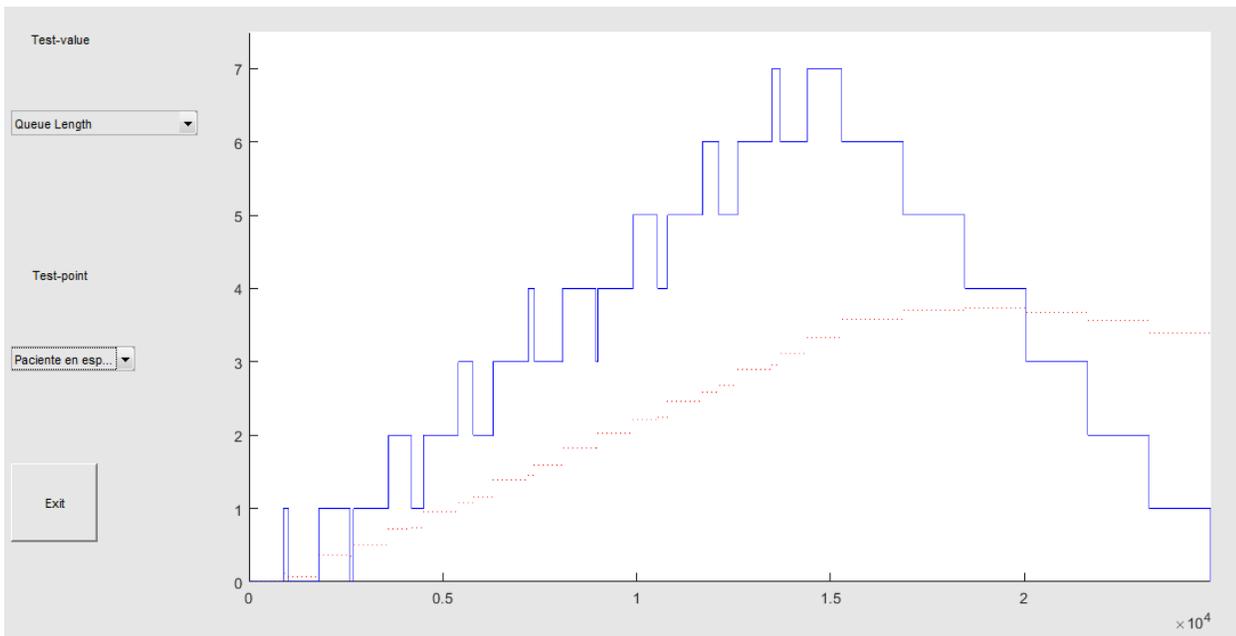


Figura 4-13: Gráfica del índice Queue Length de la plaza Paciente en espera.

5 Optimización del modelo de adquisición

En este capítulo se presentan las propuestas de optimización que se generaron en base a cambios de proceso y estructura del modelo actual del hospital la Victoria. En cada una de ellas se presentara una descripción de los cambios y el impacto que estos generarían. La principal desventaja que presenta estas optimizaciones son el costo del recurso extra.

5.1. Propuesta de optimización número 1

En este modelo se presenta el proceso de adquisición con el orden del modelo actual pero esta vez asistido por dos tecnólogos donde a cada uno le corresponde un conjunto de procesos consecutivos (Figura (5-1)).

En esta propuesta el tecnólogo 1 realiza los procesos desde recibir al paciente hasta la ejecución del disparo y luego vuelve a estar disponible para recibir otro paciente. El segundo tecnólogo recibirá el paciente luego del disparo, realizará los procesos desde la digitalización y arreglo de la imagen hasta la que finalice la solicitud de lectura y nuevamente estará disponible para recibir otro paciente que acaba que le delegue el tecnólogo 1.

Esta optimización tiene un tiempo de simulación sin tener en cuenta los primeros 900 segundos de 15892.2 segundos, logrando una disminución de 37.37% en tiempo en relación al modelo actual, con un tiempo de atención por paciente de 993.26 segundos o 16.55 minutos.

Respecto a los índices de rendimiento global (Figura (5-2) y (5-3)) se puede observar que los valores del índice de *Utilization* poseen un comportamiento mas homogéneo, y el valor de espera paso de ser del 0.96574 a 0.14246 generando un mayor alivio en esta transición. Por otra parte ningún valor dentro del proceso del índice de *Queue Length* llega a generar un embotellamiento, todos los valores se encuentran por debajo de 1.

En contraste con el análisis dinámico del índice de rendimiento *Queue Length* de la plaza de "Paciente en espera" del modelo actual, el índice de esta optimización genera un panorama prometedor (Figura 5-4), en la gráfica se muestra que en ningún momento se genera un embotellamiento (acumulación de tokens), sin embargo, a medida que transcurre la simulación

la duración del paciente que se encuentra en espera va en aumento, el ultimo paciente en la simulación dura en la transición 806.4 segundos o 13.44 minutos.

Esta propuesta de optimización posee una gran ventaja sobre el tiempo total del proceso del adquisición, elimina los embotellamientos de pacientes en espera y genera alivios en las transiciones relacionadas.

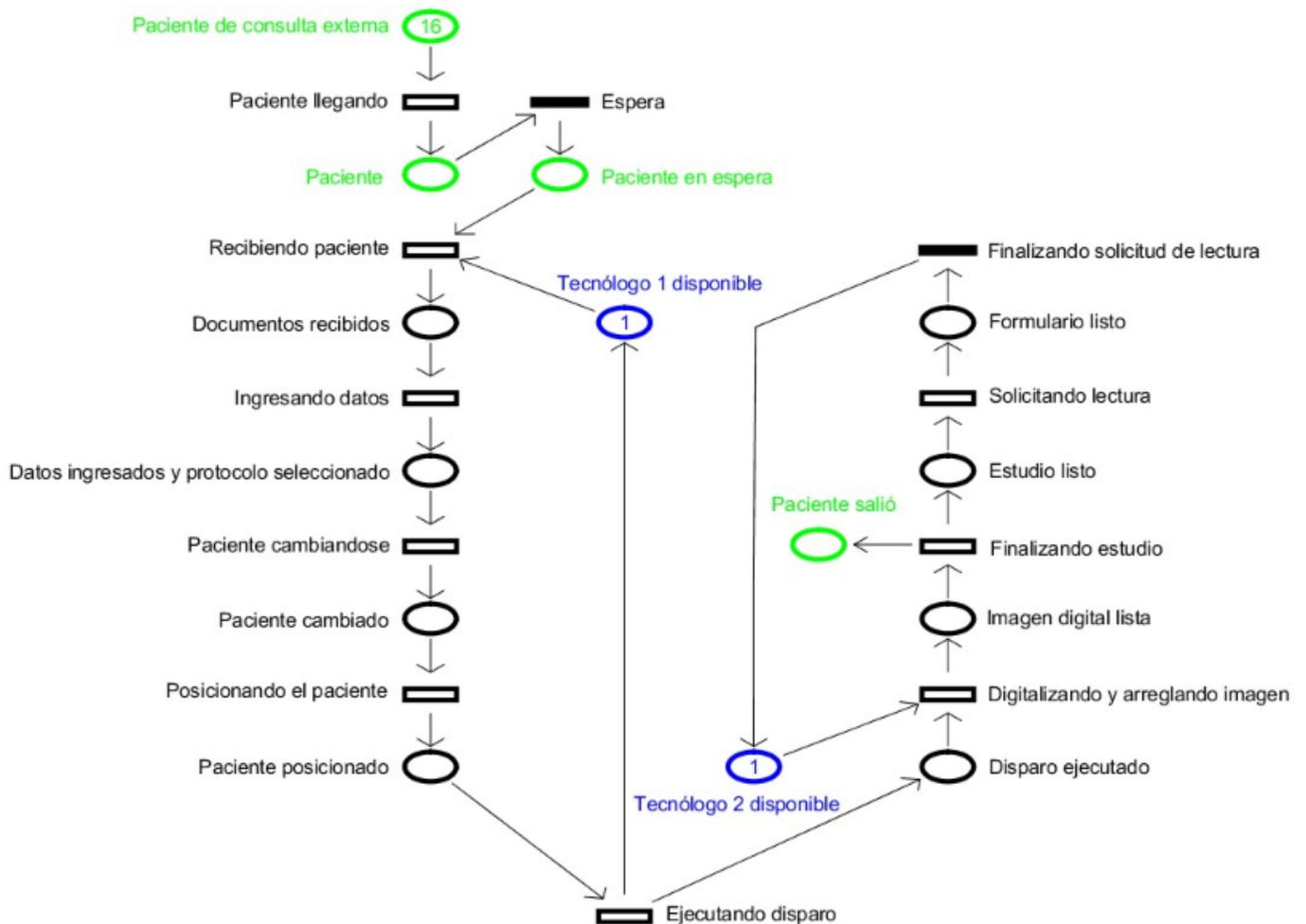


Figura 5-1: Modelo de propuesta de optimización número 1

Global Statistics: Transitions

Model:opti1.xml

Events:176

Time:16792.2

Transition Name	Service Sum	Service Rate	Service Dist.	Service Time	Utilization
Paciente llegando	16	0.00095282	1049.5125	900	1
Recibiendo paciente	16	0.00095282	1049.5125	126	0.20699
Paciente cambiando	16	0.00095282	1049.5125	264	0.31418
Posicionando el paciente	16	0.00095282	1049.5125	324.36	0.35238
Ejecutando disparo	16	0.00095282	1049.5125	95.4	0.12854
Digitalizando y arreglando imagen	16	0.00095282	1049.5125	248.04	0.25921
Finalizando estudio	16	0.00095282	1049.5125	240	0.23725
Solicitando lectura	16	0.00095282	1049.5125	144	0.13721
Ingresando datos	16	0.00095282	1049.5125	144	0.21556
Espera	16	0.00095282	1049.5125	0	0.14246
Finalizando solicitud de lectura	16	0.00095282	1049.5125	0	0

Figura 5-2: Índices globales de desempeño de las transiciones de propuesta de optimización número 1

Global Statistics: Places

Model:opti1.xml

Events:176

Time:16792.2

Place Name	Arrival Sum	Arrival Rate	Arrival Dist.	Throughput Sum	Throughput Rate	Throughput Dist.	Waiting Time	Queue Length
Paciente de consulta externa	0	0	Inf	16	0.00095282	1049.5125	7650	7.2891
Paciente	16	0.00095282	1049.5125	16	0.00095282	1049.5125	0	0
Tecnólogo 1 disponible	16	0.00095282	1049.5125	16	0.00095282	1049.5125	221.7525	0.21129
Documentos recibidos	16	0.00095282	1049.5125	16	0.00095282	1049.5125	144	0.13721
Paciente cambiado	16	0.00095282	1049.5125	16	0.00095282	1049.5125	324.36	0.30906
Paciente posicionado	16	0.00095282	1049.5125	16	0.00095282	1049.5125	95.4	0.090899
Disparo ejecutado	16	0.00095282	1049.5125	16	0.00095282	1049.5125	248.04	0.23634
Imagen digital lista	16	0.00095282	1049.5125	16	0.00095282	1049.5125	240	0.22868
Estudio listo	16	0.00095282	1049.5125	16	0.00095282	1049.5125	144	0.13721
Tecnólogo 2 disponible	16	0.00095282	1049.5125	16	0.00095282	1049.5125	665.5125	0.63412
Formulario listo	16	0.00095282	1049.5125	16	0.00095282	1049.5125	0	0
Datos ingresados y protocolo seleccionado	16	0.00095282	1049.5125	16	0.00095282	1049.5125	264	0.25155
Paciente en espera	16	0.00095282	1049.5125	16	0.00095282	1049.5125	529.2	0.50423
Paciente salió	16	0.00095282	1049.5125	0	0	Inf	Inf	6.9529

Figura 5-3: Índices globales de desempeño de las plazas de propuesta de optimización número 1

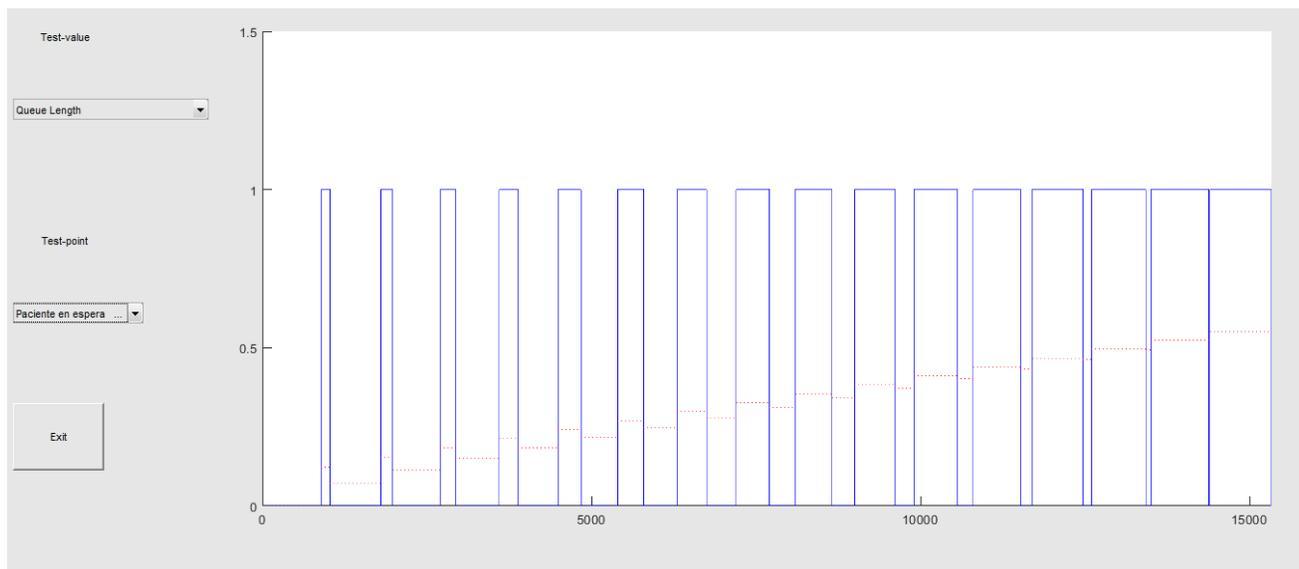


Figura 5-4: Gráfica del índice *Queue Length* de la plaza Paciente en espera de la propuesta de optimización número 1

5.2. Propuesta de optimización número 2

En este modelo se presenta el proceso de adquisición con el orden del modelo actual pero esta vez asistido por dos tecnólogos donde a cada uno le corresponde un conjunto de procesos alternados (Figura (5-5)).

En esta propuesta el tecnólogo 1 realiza los procesos desde recibir al paciente hasta cuando se ingresan los datos demográficos; al finalizar vuelve a estar disponible. El segundo tecnólogo continua con el paciente desde que le indica el cambio de prendas hasta que ejecuta el disparo y queda disponible para realizar el mismo procedimiento; el restante del procedimiento es realizado nuevamente por el tecnólogo 1.

Esta optimización tiene un tiempo de simulación, retirando los primeros 900 segundos, de 15114.36 segundos, logrando una disminución de 40.4309 % en tiempo en relación al modelo actual, con un tiempo de atención por paciente de 944.6475 segundos o 15.74412 minutos. El modelo de esta simulación garantiza el tiempo más aproximado a la del agendamiento de consulta, con una diferencia de 44.6475 segundos.

Respecto a los índices de rendimiento global (Figura (5-6) y (5-7)) se puede observar que los valores del índice de *Utilization* poseen un comportamiento mas homogéneo, y el valor de espera paso de ser del 0.96574 a 0.13926 generando un mayor alivio en esta transición. Por otra parte ningún valor dentro del proceso del índice de *Queue Length* llega a generar

un embotellamiento, todos los valores se encuentran por debajo de 1.

En la Figura (5-8) se muestra la dinámica del índice de rendimiento *Queue Length* de la plaza de “Paciente en espera” de ésta propuesta de optimización, en ella se puede evidenciar que no se genera ni embotellamiento en el proceso ni aumento en la utilización del mismo.

Como los resultados de la simulación lo demuestran y en contraste con el modelo actual del hospital la Victoria se considera éste como el modelo mas óptimo.

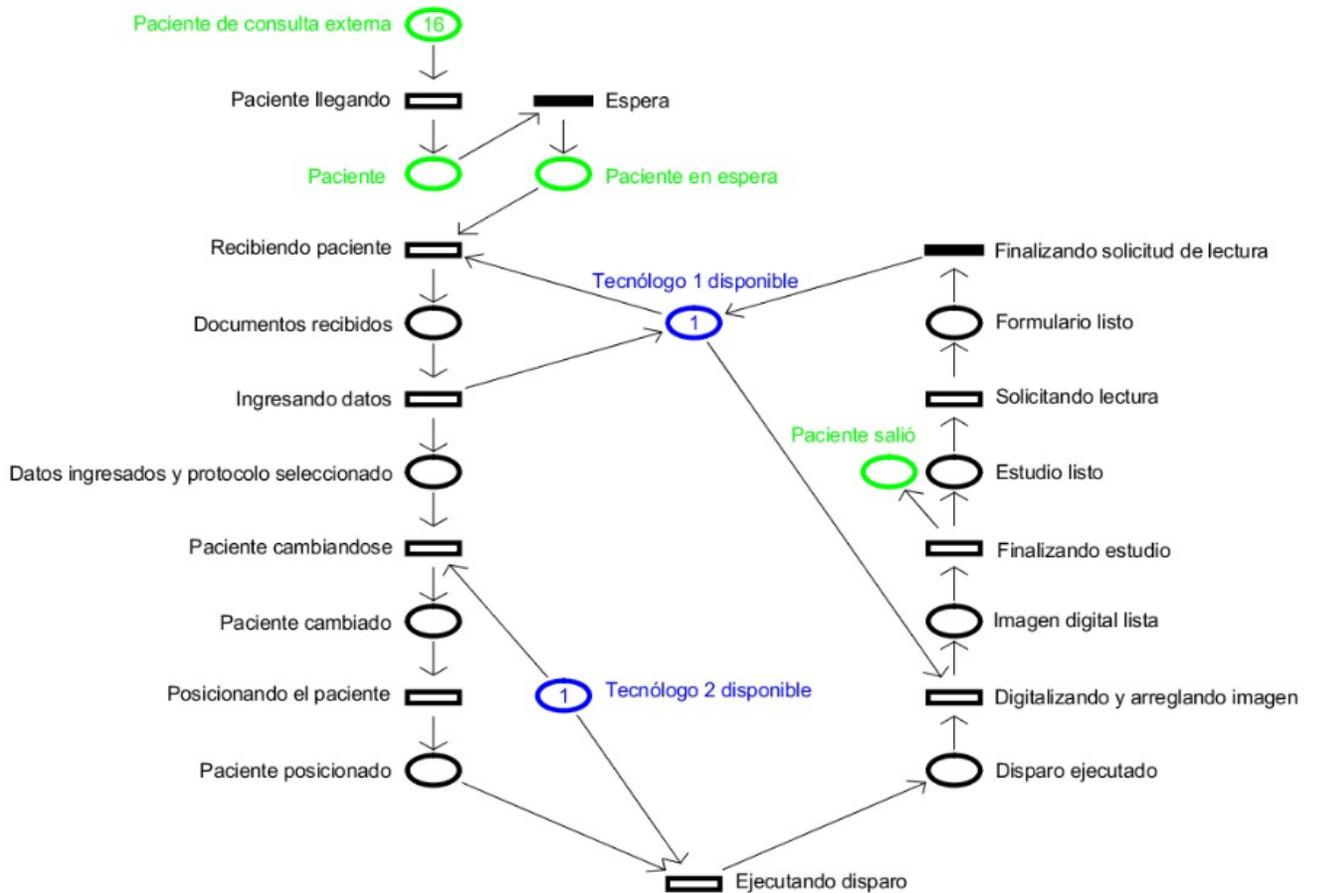


Figura 5-5: Modelo de propuesta de optimización número 2

Global Statistics: Transitions

Model:Opti2.xml

Events:176

Time:16014.36

Transition Name	Service Sum	Service Rate	Service Dist.	Service Time	Utilization
Paciente llegando	16	0.0009991	1000.8975	900	1
Recibiendo paciente	16	0.0009991	1000.8975	126	0.21704
Paciente cambiando	16	0.0009991	1000.8975	264	0.32944
Posicionando el paciente	16	0.0009991	1000.8975	324.36	0.36949
Ejecutando disparo	16	0.0009991	1000.8975	95.4	0.13478
Digitalizando y arreglando imagen	16	0.0009991	1000.8975	248.04	0.2718
Finalizando estudio	16	0.0009991	1000.8975	240	0.24878
Solicitando lectura	16	0.0009991	1000.8975	144	0.14387
Ingresando datos	16	0.0009991	1000.8975	144	0.22603
Espera	16	0.0009991	1000.8975	0	0.10081
Finalizando solicitud de lectura	16	0.0009991	1000.8975	0	0

Figura 5-6: Índices globales de desempeño de las transiciones de propuesta de optimización número 2

Global Statistics: Places

Model:Opti2.xml

Events:176

Time:16014.36

Place Name	Arrival Sum	Arrival Rate	Arrival Dist.	Throughput Sum	Throughput Rate	Throughput Dist.	Waiting Time	Queue Length
Paciente de consulta externa	0	0	Inf	16	0.0009991	1000.8975	7650	7.6431
Paciente	16	0.0009991	1000.8975	16	0.0009991	1000.8975	0	0
Tecnólogo 1 disponible	32	0.0019982	500.4488	32	0.0019982	500.4488	236.4488	0.47247
Documentos recibidos	16	0.0009991	1000.8975	16	0.0009991	1000.8975	144	0.14387
Paciente cambiado	16	0.0009991	1000.8975	16	0.0009991	1000.8975	324.36	0.32407
Paciente posicionado	16	0.0009991	1000.8975	16	0.0009991	1000.8975	95.4	0.095314
Disparo ejecutado	16	0.0009991	1000.8975	16	0.0009991	1000.8975	452.55	0.45214
Imagen digital lista	16	0.0009991	1000.8975	16	0.0009991	1000.8975	240	0.23978
Estudio listo	16	0.0009991	1000.8975	16	0.0009991	1000.8975	144	0.14387
Tecnólogo 2 disponible	16	0.0009991	1000.8975	16	0.0009991	1000.8975	581.1375	0.58062
Formulario listo	16	0.0009991	1000.8975	16	0.0009991	1000.8975	0	0
Datos ingresados y protocolo seleccionado	16	0.0009991	1000.8975	16	0.0009991	1000.8975	264	0.26376
Paciente en espera	16	0.0009991	1000.8975	16	0.0009991	1000.8975	139.3875	0.13926
Paciente salió	16	0.0009991	1000.8975	0	0	Inf	Inf	6.6987

Figura 5-7: Índices globales de desempeño de las plazas de propuesta de optimización número 2

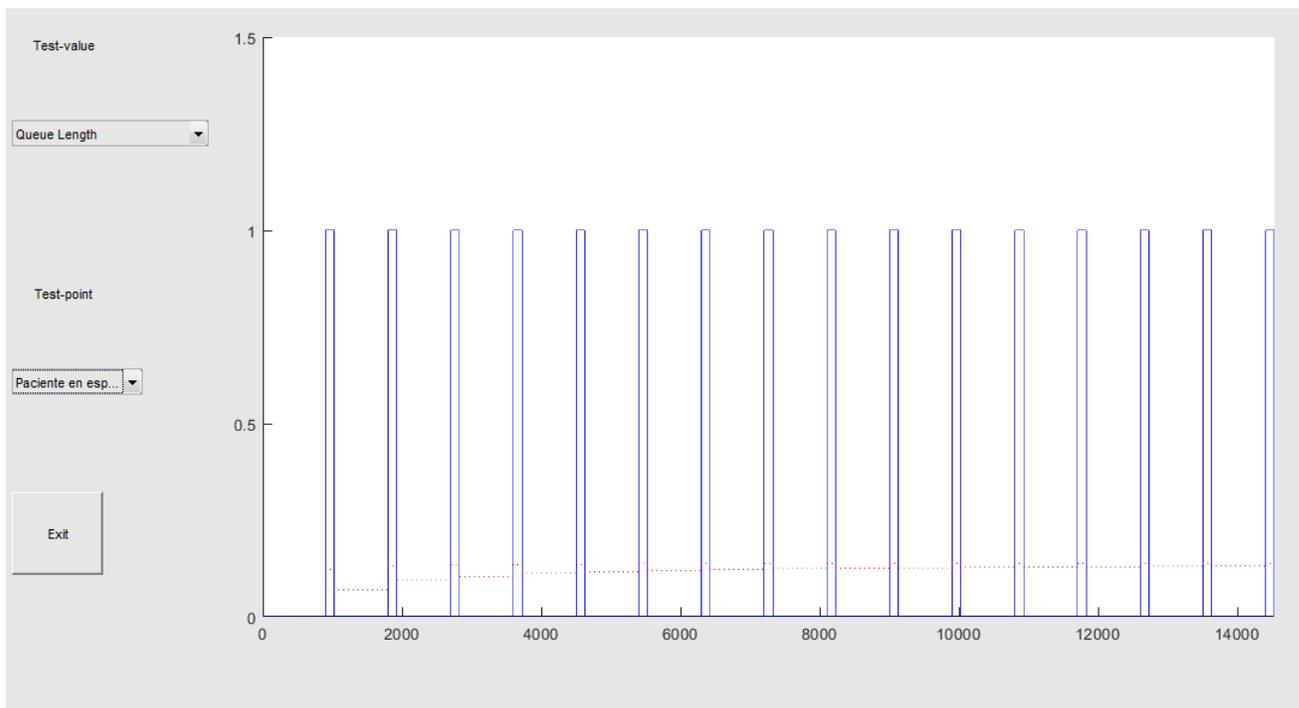


Figura 5-8: Gráfica del índice *Queue Length* de la plaza Paciente en espera de la propuesta de optimización número 2

5.3. Propuesta de optimización número 3

En este modelo se presenta el proceso de adquisición con dos tecnólogos donde a cada uno le corresponde un conjunto de procesos alternados (Figura (5-9)).

En este modelo el tecnólogo 1 esta a cargo de los procesos “Recibiendo paciente” y “Ingresando datos” y luego vuela a estar disponible para realizar nuevamente estos procesos o para encargarse del proceso desde “Solicitud de lectura” hasta finalizar el proceso de adquisición. El segundo tecnólogo realiza los procesos desde “Paciente cambiandose” hasta “Finalizando estudio”.

Esta optimización tiene un tiempo de simulación, sin tener en cuenta los primeros 900 segundos, de 19162.8 segundos, logrando una disminución de 24.4751 % en tiempo en relación al modelo actual, con un tiempo de atención por paciente de 1197.675 segundos o 19.96125 minutos.

Respecto a los índices de rendimiento global (Figura (5-10) y (5-11)) se puede observar el valor del índice de *Utilization* del paciente en espera paso de ser del 0.96574 a 0.10336 generando un mayor alivio en esta transición, sin embargo, el índice de “Datos ingresados y

protocolo seleccionado” tiene un valor de 1.8334 generando un retraso el lugar.

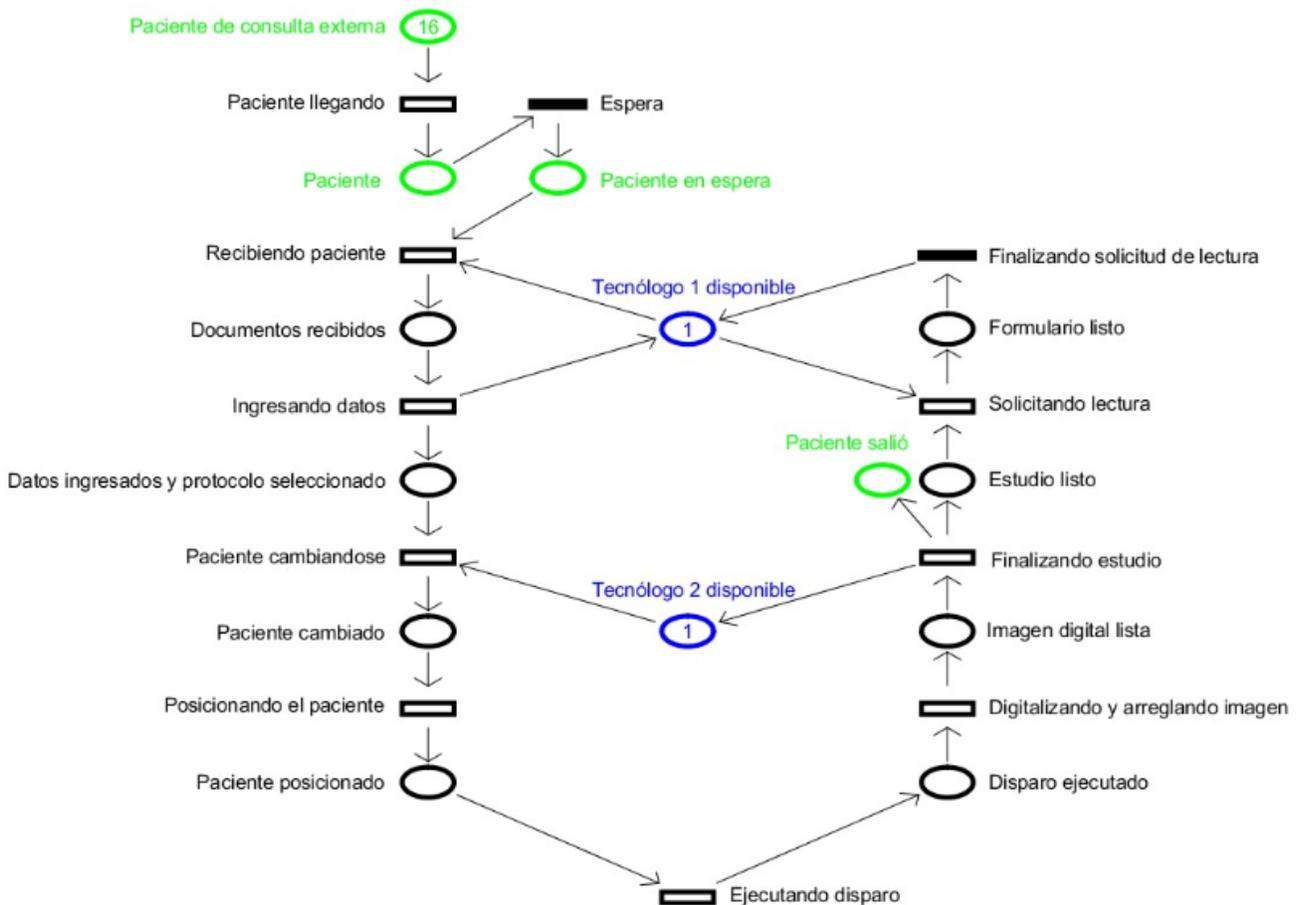


Figura 5-9: Modelo de propuesta de optimización número 3

Global Statistics: Transitions

Model: Opti3.xml

Events: 176

Time: 20062.8

Transition Name	Service Sum	Service Rate	Service Dist.	Service Time	Utilization
Paciente llegando	16	0.0007975	1253.925	900	1
Recibiendo paciente	16	0.0007975	1253.925	126	0.82595
Paciente cambiando	16	0.0007975	1253.925	264	0.26296
Posicionando el paciente	16	0.0007975	1253.925	324.36	0.29493
Ejecutando disparo	16	0.0007975	1253.925	95.4	0.10758
Digitalizando y arreglando imagen	16	0.0007975	1253.925	248.04	0.21695
Finalizando estudio	16	0.0007975	1253.925	240	0.19858
Solicitando lectura	16	0.0007975	1253.925	144	0.11484
Ingresando datos	16	0.0007975	1253.925	144	0.83312
Espera	16	0.0007975	1253.925	0	0.95514
Finalizando solicitud de lectura	16	0.0007975	1253.925	0	0

Figura 5-10: Índices globales de desempeño de las transiciones de propuesta de optimización número 3

Global Statistics: Places

Model: Opti3.xml

Events: 176

Time: 20062.8

Place Name	Arrival Sum	Arrival Rate	Arrival Dist.	Throughput Sum	Throughput Rate	Throughput Dist.	Waiting Time	Queue Length
Paciente de consulta externa	0	0	Inf	16	0.0007975	1253.925	7650	6.1008
Paciente	16	0.0007975	1253.925	16	0.0007975	1253.925	0	0
Tecnólogo 1 disponible	32	0.001595	626.9625	32	0.001595	626.9625	554.9625	0.88516
Documentos recibidos	16	0.0007975	1253.925	16	0.0007975	1253.925	144	0.11484
Paciente cambiado	16	0.0007975	1253.925	16	0.0007975	1253.925	324.36	0.25868
Paciente posicionado	16	0.0007975	1253.925	16	0.0007975	1253.925	95.4	0.076081
Disparo ejecutado	16	0.0007975	1253.925	16	0.0007975	1253.925	248.04	0.19781
Imagen digital lista	16	0.0007975	1253.925	16	0.0007975	1253.925	240	0.1914
Estudio listo	16	0.0007975	1253.925	16	0.0007975	1253.925	175.725	0.14014
Tecnólogo 2 disponible	16	0.0007975	1253.925	16	0.0007975	1253.925	346.125	0.27603
Formulario listo	16	0.0007975	1253.925	16	0.0007975	1253.925	0	0
Datos ingresados y protocolo seleccionado	16	0.0007975	1253.925	16	0.0007975	1253.925	2298.9	1.8334
Paciente en espera	16	0.0007975	1253.925	16	0.0007975	1253.925	129.6	0.10336
Paciente salió	16	0.0007975	1253.925	0	0	Inf	Inf	7.1236

Figura 5-11: Índices globales de desempeño de las plazas de propuesta de optimización número 3

En la Figura (5-12) se muestra la dinámica del índice de rendimiento *Queue Length* de la plaza de “Paciente en espera” de ésta propuesta de optimización, en ella se puede eviden-

ciar que no se genera ni embotellamiento en el proceso ni aumento en la utilización del mismo.

En la Figura (5-13) se muestra la dinámica del índice de rendimiento *Queue Length* de la plaza de “Datos ingresados y protocolo seleccionado” de ésta propuesta de optimización, en ella se puede evidenciar que de 5000 segundos empieza a generar una acumulación de pacientes en esta plaza, esta acumulación llega a un máximo de cuatro pacientes en los 12000 segundos de la simulación.

Aunque este modelo promete una disminución en el tiempo de atención al paciente en contraste con el modelo actual del hospital, la generación de un embotellamiento de pacientes en un proceso que se ejecuta dentro del servicio lo exonera de ser el modelo ideal para una implementación.

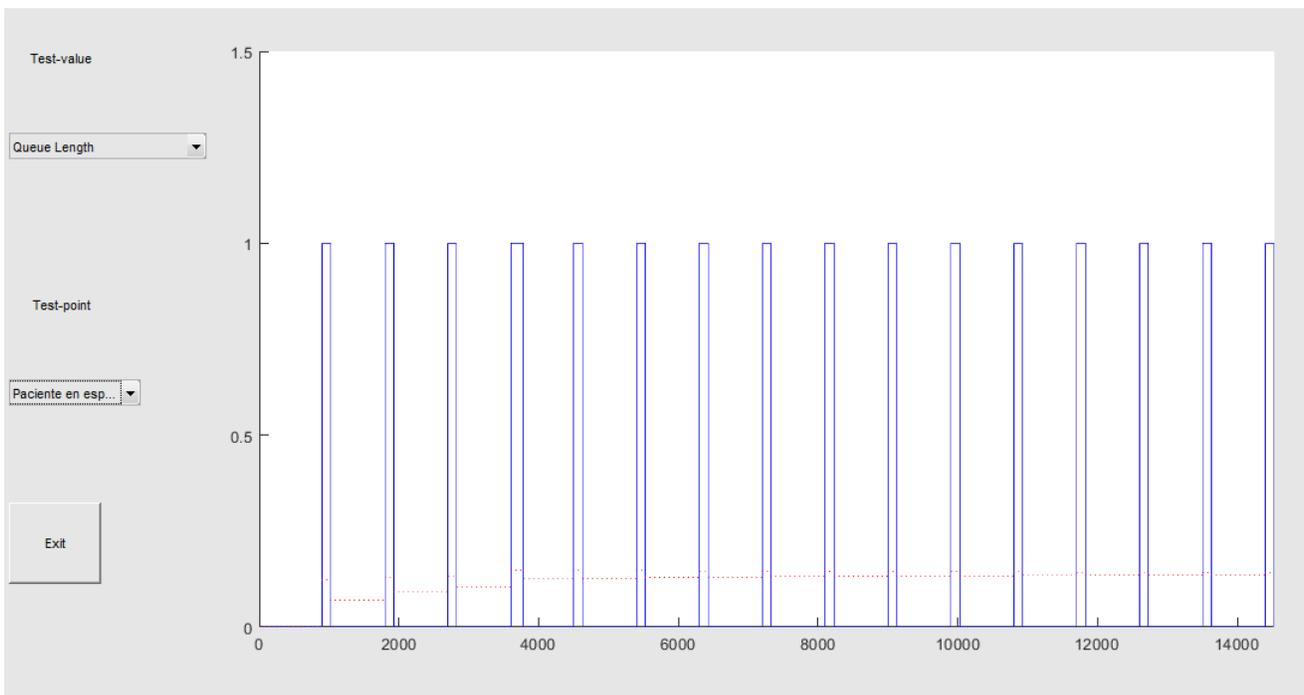


Figura 5-12: Gráfica del índice *Queue Length* de la plaza Paciente en espera de la propuesta de optimización número 3

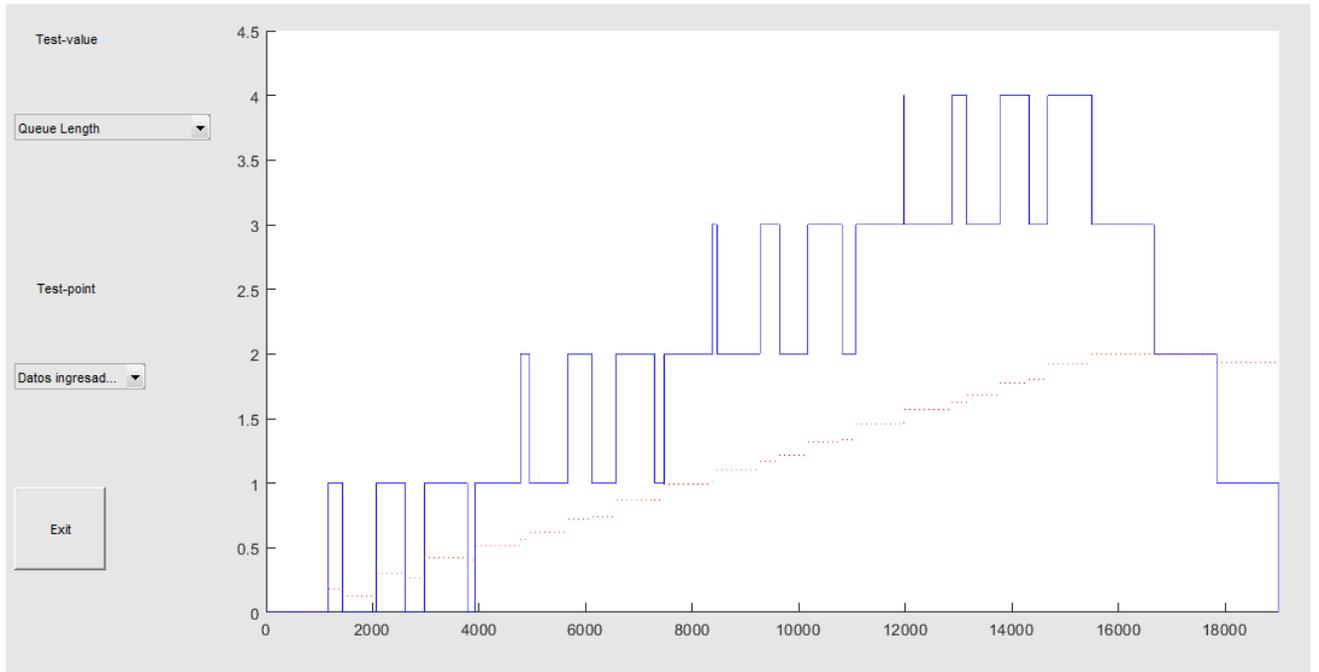


Figura 5-13: Gráfica del índice *Queue Length* de la plaza Datos ingresados y protocolo seleccionado de la propuesta de optimización número 3

En la tabla (5-1), se presenta un resumen de los modelos de propuesta de optimización con sus respectivas ventajas y desventajas.

Finalmente en los anexos del (7-6) al (7.5), se presenta el documento con las recomendaciones para el servicio de rayos X del Hospital la Victoria.

Tabla 5-1: Síntesis de los modelos propuestos

Propuesta de optimización	Ventajas	Desventajas
Optimización 1	Disminuye en un 37.37% el tiempo de atención respecto al modelo actual, con una atención al paciente de 19.96125 minutos y elimina el embotellamiento en la Plaza mas afectada por el modelo actual "Paciente en espera"	Requiere de un segundo tecnólogo y no genera un embotellamiento en "Paciente en espera", sin embargo, a medida que transcurre la simulación la duración del paciente que se encuentra en espera va en aumento, el ultimo paciente en la simulación dura en la transición 13.44 minutos
Optimización 2	Disminuye en un 40.4309% el tiempo de atención respecto al modelo actual, con una atención al paciente de 15.74412 minutos, elimina el embotellamiento en la Plaza mas afectada por el modelo actual "Paciente en espera" y no presenta embotellamiento en ningún proceso	Requiere de un segundo tecnólogo
Optimización 3	Disminuye en un 24.4751% el tiempo de atención respecto al modelo actual, con una atención al paciente de 19.96125 minutos y elimina el embotellamiento en la Plaza mas afectada por el modelo actual "Paciente en espera"	Requiere de un segundo tecnólogo y genera un embotellamiento en "Datos ingresados y protocolo seleccionado" de hasta cuatro pacientes

6 Conclusiones y trabajo futuro

6.1. Conclusiones

En el presente trabajo se logró elegir las IPS clientes de la empresa Radiología Digital S.A.S. ubicadas en la ciudad de Bogotá con mayor problemática en la etapa de *Imaging*, tomando como criterios el tiempos de oportunidad entre la toma del examen y la solicitud de lectura y la cuantificación y categorización de las novedades, ambos criterios correspondientes al segundo semestre de año 2019. En estos criterios se pudieron observar importantes problemas, como la falta de estandarización de las novedades y los altos tiempos de oportunidad que arrojaron las IPS clientes.

Se realizó un análisis epidemiológico de la población que permitió identificar que más de la mitad de los pacientes requieren de una atención especial. Los rangos de la mayoría de pacientes pertenecen a las estratificación de 0 a 5 años y de 60 años o más, pacientes que requieren un acompañamiento para el examen, es posible que esta población pueda ser la causante de los retrasos en el indicador de oportunidad. Dada la importancia de la población en el proceso de adquisición de imagen de rayos X, se propone llevar a cabo la encuesta en este trabajo formulada y que se encuentra disponible en los anexos (7-11), (7-12) y (7-13), que pretende estudiar los valores de las transiciones en estudios frecuentes por población.

Gracias a los datos arrojados por la cuantificación de imágenes de rayos X, se identificó que el mayor porcentaje de examen que se solicita es la radiografía de Tórax (P.A. o A.P y lateral, decúbito lateral, OB) con un 49.47%), se puede generar una disminución en la transición “Posicionando paciente” si se agendan por lo menos este porcentaje de examen de forma seguida, esto evitara que nuevamente se deba posicionar el equipo por cada tipo de examen y se mantenga posicionado para el examen de tórax.

A partir del uso de un instrumento de recolección de datos se modeló y cuantificó los tiempos y procesos de la etapa *Imaging* que permitieron se modelar y simular el proceso actual de toma de imágenes diagnosticas de rayos X del hospital la Victoria utilizando redes de Petri, este modelo permitió considerar los puntos más débiles en el proceso en cuanto a generación de retrasos. El modelo permitió evidenciar un retraso en la atención de 11.53 minutos respecto al agendamiento de citas para este servicio y un embotellamiento de hasta 7.3198 en la plaza de “Paciente en espera”.

Se simularon tres estructuras del proceso, cada una generó características de optimización de tiempo en la plaza mas crítica y en el tiempo total de la jornada. Los resultados de la simulación de la segunda propuesta de optimización la posicionan como el mejor candidato de para una implementación, generó una disminución de 40.4309 % del tiempo de atención al paciente respecto al modelo actual del hospital y eliminó el embotellamiento en la plaza mas crítica sin generarlo en otros procesos.

6.2. Trabajo futuro

Como se mencionó en el capítulo 3, el mayor inconveniente que se presentó al momento de analizar las novedades fue la falta de estandarización, realizar la clasificación de cada una de forma manual es un procedimiento que toma mucho tiempo dependiendo de la ventana de tiempo y el número de clientes, para este trabajo por ejemplo, fue necesario clasificar más de 600 novedades, en solución a ésto se propone adoptar estas categorias en el PACS para el reporte de novedades estructuradas de modo que facilite el análisis posteriori de las misma.

La ventaja de las redes de Petri es que se pueden diseñar tan específicas como se desee permitiéndonos analizar factores restantes en el proceso de adquisición de rayos X, por ejemplo, el análisis por jornadas de trabajo, tipo de estudio y servicio que solicita (urgencias, medicina interna, urología...) entre otros. También se puede usar para optimizar otras modalidades de estudio como el de tomografía computarizada, ecografía, resonancia magnética nuclear.

Como trabajo futuro se propone adquirir la toma de datos de forma presencial para corroborar los tiempos de las transiciones usados y validar la optimización con pruebas piloto en el servicio de adquisición de imagen rayos X del Hospital la Victoria.

Por último, la metodología aquí planteada para la etapa de *Imaging* puede ser usada para evaluar y optimizar el servicio de imágenes de rayos X de otras IPS clientes, también puede funcionar como base para analizar las etapas restantes del proceso I+D+R (*Data y Report*).

7 Anexos

7.1. Anexo A: Porcentaje de novedades

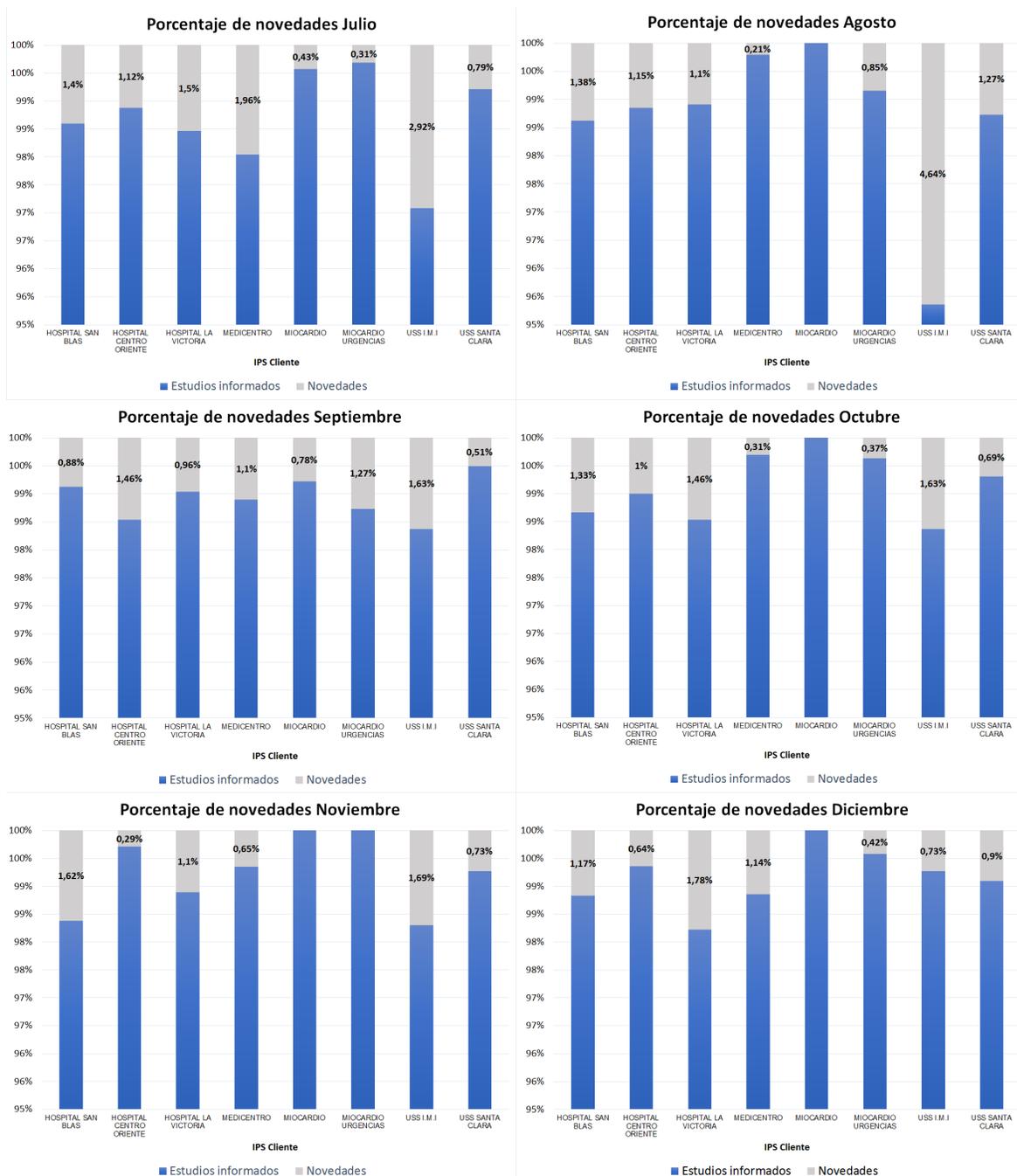


Figura 7-1: Porcentaje de novedades respecto a estudios informados de cada mes

7.2. Anexo B: Tiempo de oportunidad

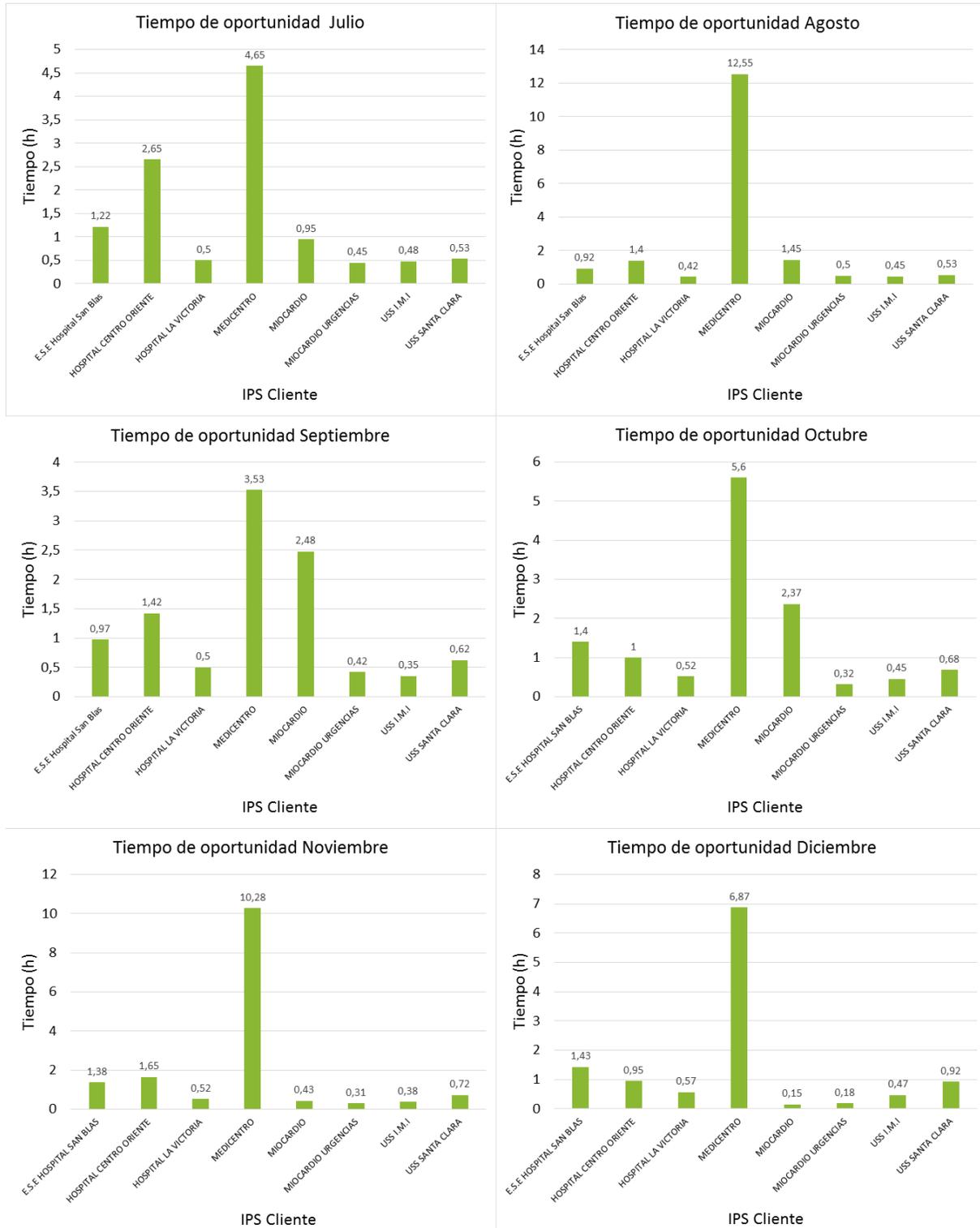


Figura 7-2: Tiempo de oportunidad de cada mes

7.3. Anexo C: Análisis epidemiológico

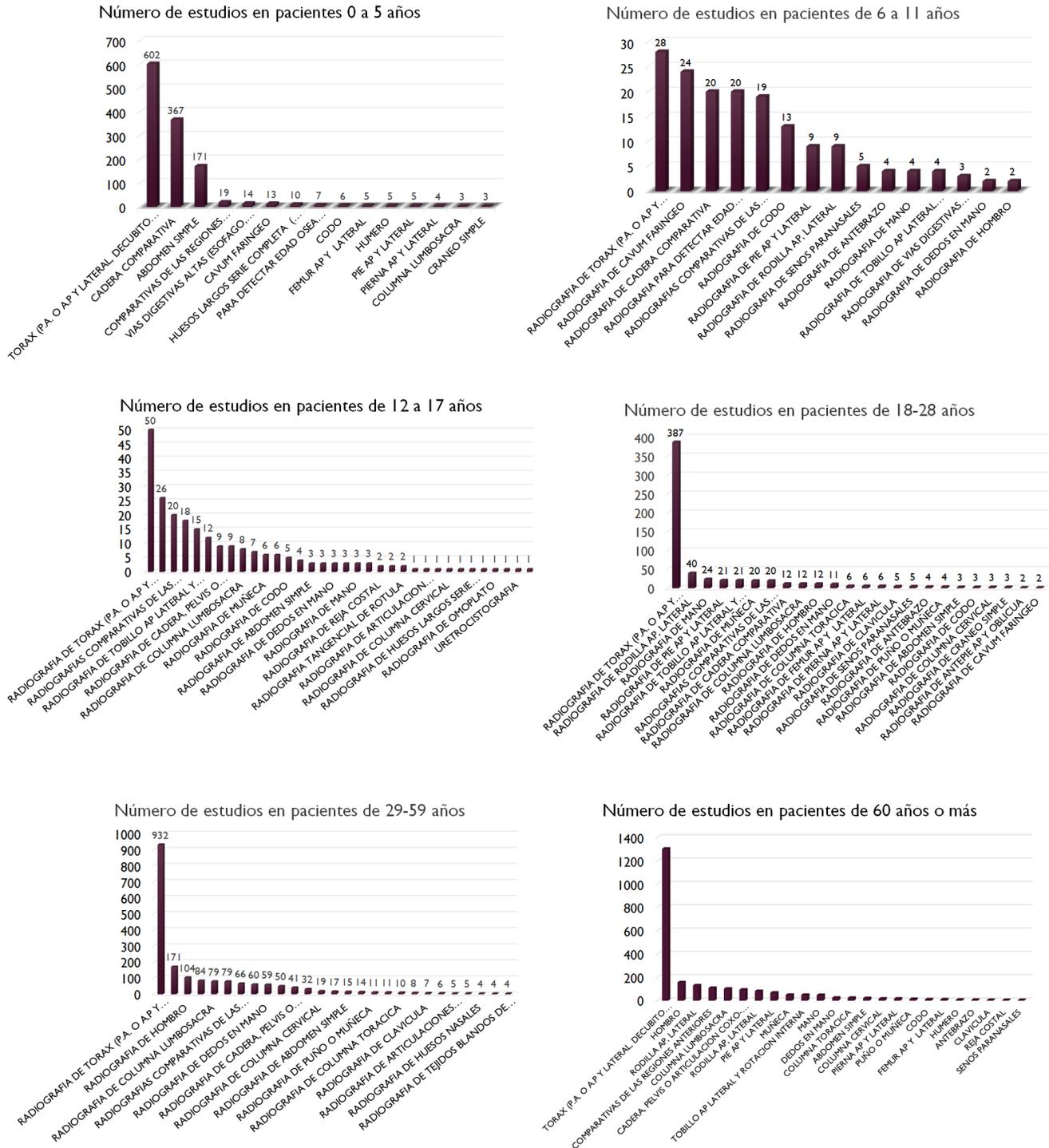


Figura 7-3: Número de estudios de tipo de estudios según la estratificación de edad

7.4. Anexo D: Encuesta a tecnólogos

Encuesta Tecnólogos Servicio de Radiología en el Hospital la Victoria

***Obligatorio**

Preguntas sobre el Servicio

Por favor diligencie el siguiente cuestionario a conciencia y de forma detallada.

Algunas veces es posible que sea necesario repetir proyecciones. En su quehacer diario, por cada 20 estudios tomados ¿Cuántas proyecciones en promedio debe repetir, cualquiera sea la causa? *

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Mencione las causas por las cuales ocasionalmente debe repetir la toma de alguna proyección *

Tu respuesta

¿Qué estudio(s) considera que es más difícil de tomar para conseguir imágenes con calidad? ¿Y por qué? *

Tu respuesta

¿Qué capacitaciones recibió en los procesos del servicio durante el segundo semestre de 2019, relacionados con la adquisición de imágenes? *

Tu respuesta

¿Cuánto tiempo en promedio tarda en realizar un estudio, desde el ingreso del paciente al servicio hasta la solicitud de lectura? *

Tu respuesta

Describe los pasos que usted considera que se llevan a cabo para la toma del estudio en el servicio de radiología en el Hospital la Victoria *

Tu respuesta

[Atrás](#) [Sigüiente](#)

Nunca envíes contraseñas a través de Formularios de Google.
Este formulario se creó en radiologia.co. [Notificar uso inadecuado](#)

Google Formularios

Figura 7-4: Encuesta dirigida a los tecnólogos en radiología del Hospital la Victoria

Encuesta Tecnólogos Servicio de Radiología en el Hospital la Victoria

***Obligatorio**

Tiempos en la atención de pacientes de consulta externa

Por favor diligencie el tiempo que considera usted que toma realizar cada uno de los siguientes pasos durante la atención del paciente de consulta externa en el servicio de radiología (Radiología Convencional).

1. Recepción del paciente *

Tu respuesta _____

2. Ingreso de datos demográficos en el digitalizador y selección del protocolo a tomar. *

Tu respuesta _____

2. Cambio de prendas del paciente *

Tu respuesta _____

3. Posicionamiento del paciente *

Tu respuesta _____

4. Configuración de técnica y ejecución del disparo *

Tu respuesta _____

5. Posprocesamiento (Digitalización, marcación y arreglo de la imagen en consola) *

Tu respuesta _____

6. Finalizar estudio (Tiempo que demora el paciente en terminar de cambiarse y se retira) *

Tu respuesta _____

7. Solicitud del estudio para lectura en Avantage PACS *

Tu respuesta _____

[Atrás](#) [Enviar](#)

Nunca envíes contraseñas a través de Formularios de Google.
Este formulario se creó en radiologia.co. [Notificar uso inadecuado](#)

Google Formularios

Figura 7-5: Continuación 1. Encuesta dirigida a los tecnólogos en radiología del Hospital la Victoria

7.5. Anexo E: Recomendaciones: Servicio de rayos X del Hospital la Victoria

Recomendaciones: *Servicio de rayos X del Hospital la Victoria*

INTRODUCCIÓN.

En el trabajo de grado “Optimización del proceso de adquisición de imágenes diagnósticas de rayos X para clientes de la empresa Radiología Digital S.A.S. basada en redes de Petri” presentado por la estudiante de ingeniería biomédica Erika Alejandra Jiménez Medina de la Universidad Antonio Nariño en modalidad de pasantía en la empresa Radiología Digital SAS, se realizó una simulación y optimización de dicho proceso.

El Hospital la Victoria fue seleccionado debido al alto porcentaje de novedades que reporta en los últimos seis meses del año 2019. El **1,32%** de los estudios solicitados se reportan como novedad. Según los datos proporcionados por el PACS de Advantage Health Systems SAS, el hospital la Victoria presenta un tiempo de oportunidad promedio de **30.6 minutos** entre el proceso de toma de la imagen diagnóstica hasta la solicitud de lectura.

Los datos que se usaron para la presentación de este documento fueron adquiridos mediante indicadores de oportunidad computados por Radiología Digital SAS, y la aplicación de instrumento de recolección de datos dirigidos a la coordinación de imágenes diagnósticas y a los tecnólogos del servicio de rayos X del Hospital la Victoria.

DIAGNOSTICO Y RECOMENDACIÓN.

Novedades

Se realizó una categorización de las 178 novedades reportadas, con base en el reporte entregado por el radiólogo. A continuación, se definen cada una de las categorías:

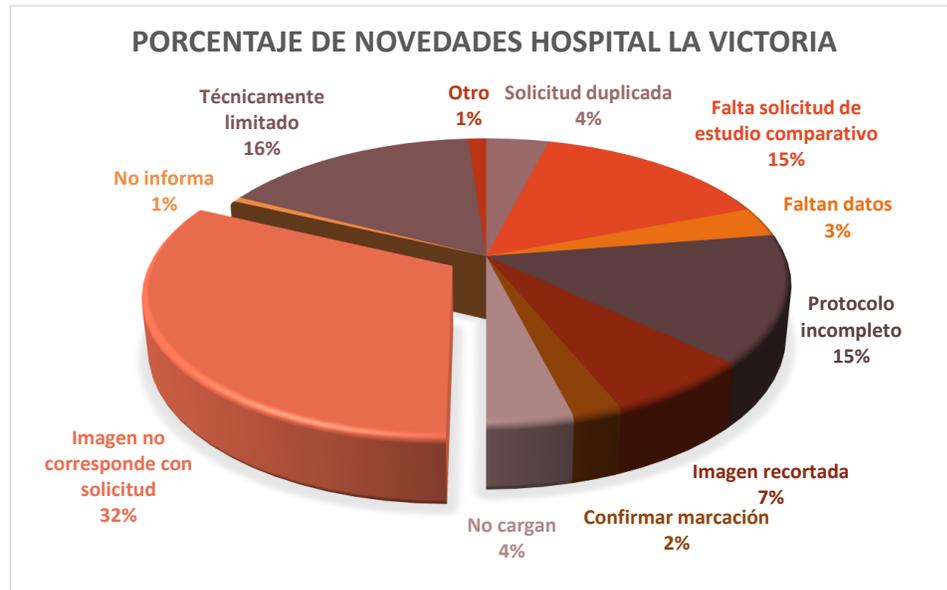
- **Solicitud duplicada:** El médico radiólogo manifiesta que el estudio se encuentra dos o más veces solicitado para lectura e interpretación.
- **Falta solicitud de estudio comparativo:** En algunos exámenes cuando se requiere estudiar un miembro afectado es necesaria la toma del otro miembro con fines comparativos, es este caso solo se realiza solicitud de uno de los dos miembros. También se reporta como “falta de lateralidad”.
- **No informa:** El radiólogo no da indicios de los motivos por qué se reporta novedad.
- **No cargan:** Las imágenes no se pueden ni visualizar ni descargar del PACS.
- **Confirmar marcación:** Cuando se realiza la toma de la imagen radiológica es necesario marcar que lado del paciente es el derecho e izquierdo, también aplica a las extremidades. Se reporta esta novedad cuando no se encuentra marcada esta lateralidad o hay dudas de correspondencia de esta.
- **Técnicamente limitado:** Se reporta que la técnica con la que se realizó el estudio no se tomó de la forma correcta, es decir, existen estructuras sobrepuestas. También se reporta cuando la imagen



Figura 7-6: Recomendaciones: Servicio de rayos X del Hospital la Victoria

velada, rotada, muy oscura, muy clara, basculada (desnivelada), con artificios en movimiento o con alta densidad de yeso.

- **Faltan datos:** El radiólogo no concluye la lectura porque los datos clínicos suministrados no fueron proporcionados o no son suficientes (edad, sexo, requiere historial, etc.).
- **Protocolo incompleto:** No se suministran todas las proyecciones que requiere el estudio.
- **Imagen recortada:** No se logra visualizar completamente una o varias imágenes.
- **Imagen no corresponde con solicitud:** La solicitud presenta un tipo diferente de estudio que el que se encuentra en el PACS.
- **Otro:** No corresponde a ninguna de las categorías.



El hospital la Victoria presentó más del 30% de las novedades relacionadas con la categoría “Imagen no corresponde con solicitud”, esta categoría está relacionada con la actividad de solicitud de lectura, más específicamente cuando el tecnólogo en radiología realiza el diligenciamiento de la información en el PACS, aunque la causa también está asociada a una falta de atención o confusión por parte del mismo, se sugiere una revisión de la interfaz que permita la confirmación de los datos y que el tecnólogo realice una segunda revisión.

Marco legal

En el servicio de rayos X del hospital la Victoria solo los pacientes que requieren de estudios especiales (con radiofármacos) y las pacientes que tiene sospecha de embarazo, realizan el diligenciamiento del consentimiento informado. Según el **Artículo 84** “Se debe informar a las

personas, incluidas en el procedimiento, sobre el riesgo de la irradiación a que se someterán, para que su participación sea bajo su libre voluntad y con conocimiento de causa. Es necesario el Consentimiento Informado de los familiares o del responsable legal cuando el sujeto de la investigación no esté en condiciones de decidir sobre su aceptación.”

Es importante que se realice el diligenciamiento informado de todos los pacientes que ingresen al servicio, el modelo de optimización que aquí se presenta permite una disminución importante en la atención respecto al modelo actual. Este tiempo puede aprovecharse para realizar este proceso.

Tiempo de oportunidad

Para obtener información de los procesos y tiempo de ejecución que toman, se formularon encuestas dirigidas a los tecnólogos como instrumento de recolección de datos. En una de estas encuestas se logró identificar los siguientes procesos:

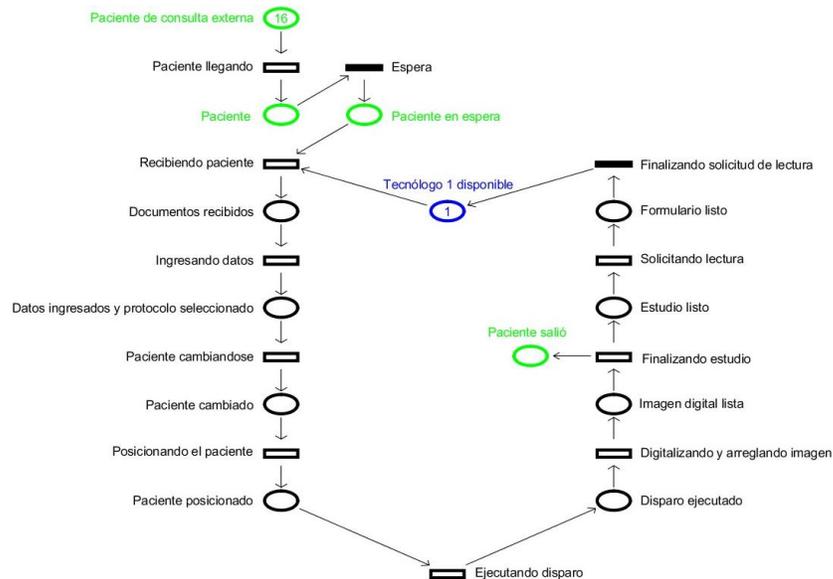
Proceso	Descripción	Tiempo de ejecución (minutos)
Paciente llegando	Tiempo sobre el cual se hace el agendamiento de la cita para la toma del estudio. En el caso del Hospital La Victoria este es cada 15 minutos.	15
Recibiendo paciente	Solo cuando el tecnólogo se encuentre disponible y el paciente este en espera, es el tiempo desde que el paciente se dirige al servicio de rayos X desde la sala de espera hasta que el tecnólogo recibe los documentos (orden médica, facturación y consentimiento informado si es el caso) en la puerta del servicio.	2.1
Ingresando datos	Tiempo que tarda el tecnólogo en ingresar los datos demográficos en el digitalizador y seleccionar el protocolo a tomar.	2.4
Paciente cambiándose	Tiempo que tarda el paciente en retirarse las prendas y accesorios que el tecnólogo crea necesarias y ponerse el blindaje de radioprotección.	4.4
Posicionando el paciente	Tiempo que tarda el tecnólogo acomodando el paciente de acuerdo a la proyección a tomar, le pide al paciente mantener la posición y en caso de ser necesario le pide control de su respiración.	5.406
Ejecutando disparo	Tiempo que tarda tecnólogo en realizar la configuración técnica de los parámetros (Kv y mA) y en realizar el disparo.	1.5
Digitalizando y arreglando imagen	Tiempo que le toma al tecnólogo digitalizar cada una de las imágenes y una vez se encuentran en el sistema arreglar, recortar y realizar marcación de las mismas.	4.134
Finalizando estudio	Tiempo desde que el tecnólogo termina de maquillar las imágenes hasta que el paciente termina de cambiarse, el tecnólogo le explica como reclamar los resultados del examen y el paciente se retira del servicio.	4

Figura 7-8: Continuación 2. Recomendaciones: Servicio de rayos X del Hospital la Victoria

Solicitando lectura	Tiempo que el tecnólogo tarda en diligenciar el formulario de las imágenes y solicitud de lectura del estudio y finaliza cuando el estudio sube en el PACS Avantage. Healt System.	2.4
Tiempo total		41.43
Tiempo total del proceso de adquisición (sin tener en cuenta los 15 minutos de espera del paciente)		26.34

Ya que el agendamiento es de 15 minutos, según los datos de la anterior tabla el tiempo de atención al paciente demora 11.43 minutos más.

A continuación, se presenta el modelo actual del procedimiento de toma de rayos X del hospital la Victoria, las plazas relacionadas a personas que intervienen en el proceso se distinguen por color, las relacionadas al paciente son de color verde y las relacionadas a los tecnólogos de color azul. De acuerdo a los datos de la simulación se espera que durante un turno (4 horas), con atención en máxima eficiencia, se atiendan 16 pacientes.



Según los resultados de la simulación, un turno tiene un embotellamiento de hasta 7 pacientes en espera.

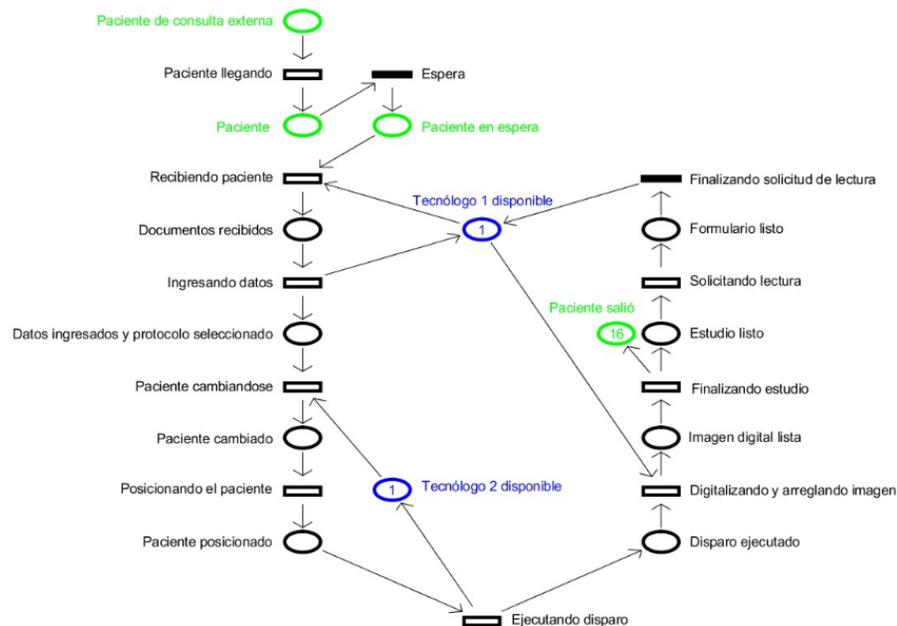


Figura 7-9: Continuación 3. Recomendaciones: Servicio de rayos X del Hospital la Victoria

RECOMENDACIONES

Se recomienda el uso de 2 tecnólogos donde el proceso que realizara cada uno se explica a continuación:

En esta propuesta el tecnólogo 1 realiza los procesos desde recibir al paciente hasta cuando se ingresan los datos demográficos; al finalizar vuelve a estar disponible. El segundo tecnólogo continua con el paciente desde que le indica el cambio de prendas hasta que ejecuta el disparo y queda disponible para realizar el mismo procedimiento; el restante del procedimiento es realizado nuevamente por el tecnólogo 1.



Esta optimización logra una disminución del 40.43\% de tiempo en relación al modelo actual, con un tiempo de atención por paciente de 15.74 minutos. El modelo de esta simulación garantiza el tiempo más aproximado a la del agendamiento de consulta, con una diferencia de 44.65 segundos. De acuerdo a este modelo no se genera ningún embotellamiento de pacientes en ninguna parte del proceso.

7.6. Anexo F: Propuesta de encuesta a tecnólogos



Encuesta a tecnólogos

La siguiente encuesta está dirigida a los tecnólogos del servicio de rayos X del hospital la Victoria, hace parte de un trabajo de grado en modalidad de pasantía en la IPS Radiología Digital SAS de una estudiante de la universidad Antonio Nariño, los datos que en ella se consignarán son con fines académicos y con el objetivo de mejorar los procesos en el servicio de radiología.

Tenga en cuenta:

Por favor tenga en cuenta los procesos aquí mencionados, son los procesos que hemos establecido para la toma de un estudio radiológico, si considera que les hace falta información que no se tuvo en cuenta o que no corresponden ciertos datos, diligencie la casilla de observaciones, de lo contrario deje en blanco:

Proceso	Descripción	Observaciones
Recibiendo paciente	Tiempo que tarda en recibir los documentos del paciente (orden médica, facturación y consentimiento informado si tiene)	
Paciente cambiándose	Tiempo que tarda el paciente retirándose las prendas en caso de ser necesario y colocarse las prendas de radio protección.	
Posicionando el paciente	Tiempo que tarda en ingresar los datos demográficos en el digitalizador y seleccionar que protocolo va a realizar	
Ejecutando disparo	Tiempo que tarda configurando los parámetros (Kv y mA) y realizando el disparo	
Digitalizando y arreglando imagen	Tiempo que tarda en arreglar, recortar y realizar marcación de las imágenes	
Finalizando estudio	Desde que termina de digitalizar hasta que el paciente termina de cambiarse y se retira	
Revisando datos del paciente y facturación	Tiempo que tarda en verificar en el sistema de la IPS los datos del paciente con el fin de corroborar que se haya solicitado dicho estudio, facturación y que se haya firmado el consentimiento informado.	
Llenando formulario de solicitud	Tiempo que tarda en diligenciar el formato para solicitar la lectura del estudio.	
Solicitando lectura	Tiempo desde que realiza la solicitud hasta que se sube a PACS Advantage Health System.	

Figura 7-11: Segunda encuesta dirigida a los tecnólogos en radiología del Hospital la Victoria



Preguntas:

1. Suponiendo que tiene un paciente de consulta externa que requiere una RADIOGRAFIA DE TORAX (P.A. O A.P Y LATERAL, DECUBITO LATERAL, OB. ¿Cuánto tiempo le toma realizar cada uno de los siguientes procesos en minutos o segundos?						
Proceso	Edad del paciente					
	0-5 años	6-11 años	12-17 años	18-28 años	29-59 años	60 años o más
Recibiendo paciente						
Paciente cambiándose						
Posicionando el paciente						
Ejecutando disparo						
Digitalizando y arreglando imagen						
Finalizando estudio						
Revisando datos del paciente y facturación						
Llenando formulario de solicitud						
Solicitando lectura						

2. Suponiendo que tiene un paciente de consulta externa que requiere una RADIOGRAFIA DE RODILLA AP, LATERAL ¿Cuánto tiempo le toma realizar cada uno de los siguientes procesos en minutos o segundos?				
Proceso	Edad del paciente			
	12-17 años	18-28 años	29-59 años	60 años o mas
Recibiendo paciente				
Paciente cambiándose				
Posicionando el paciente				
Ejecutando disparo				
Digitalizando y arreglando imagen				
Finalizando estudio				
Revisando datos del paciente y facturación				
Llenando formulario de solicitud				
Solicitando lectura				

3. Suponiendo que tiene un paciente de consulta externa que tiene entre 0 a 5 años que requiere una RADIOGRAFIA DE CADERA COMPARATIVA ¿Cuánto tiempo le toma realizar cada uno de los siguientes procesos en minutos o segundos?	
Proceso	Edad del paciente
	0-5 años
Recibiendo paciente	
Paciente cambiándose	
Posicionando el paciente	
Ejecutando disparo	
Digitalizando y arreglando imagen	
Finalizando estudio	
Revisando datos del paciente y facturación	
Llenando formulario de solicitud	
Solicitando lectura	

Figura 7-12: Continuación 1. Segunda encuesta dirigida a los tecnólogos en radiología del Hospital la Victoria

4. A continuación, por favor indique el número de proyecciones que realiza dependiendo el rango de edad del paciente para los siguientes tres estudios:		
Tipo de estudio	Edad	Número de imágenes
RADIOGRAFIA DE TORAX (P.A. O A.P Y LATERAL)	0-5 años	<input type="text"/>
	6-11 años	<input type="text"/>
	12-17 años	<input type="text"/>
	18-28 años	<input type="text"/>
	29-59 años	<input type="text"/>
	60 años o mas	<input type="text"/>
RADIOGRAFIA DE RODILLA AP, LATERAL	0-5 años	<input type="text"/>
	6-11 años	<input type="text"/>
	12-17 años	<input type="text"/>
	18-28 años	<input type="text"/>
	29-59 años	<input type="text"/>
	60 años o mas	<input type="text"/>
RADIOGRAFIA DE CADERA COMPARATIVA	0-5 años	<input type="text"/>
	6-11 años	<input type="text"/>
	12-17 años	<input type="text"/>
	18-28 años	<input type="text"/>
	29-59 años	<input type="text"/>
	60 años o mas	<input type="text"/>

Figura 7-13: Continuación 2. Segunda encuesta dirigida a los tecnólogos en radiología del Hospital la Victoria

Bibliografía

- [1] Paula Andrea Velásquez-Restrepo, Alma Karina Rodríguez-Quintero, and Juan Sebastián Jaén-Posada. Metodologías cuantitativas para la optimización del servicio de urgencias: una revisión de la literatura. *Revista Gerencia y Políticas de Salud*, 10(21):196–218, 2011.
- [2] E. Bedoya. Protocolo semi-automático para el cálculo de indicadores de oportunidad en el proceso de adquisición, lectura y reporte (i+d+r) de imágenes radiológicas. Universidad Antonio Nariño, 2019.
- [3] Simulación de eventos. *Centro cultural Itaca*.
- [4] Iván Darío López López, Joaquín Urrea Arbeláez, and Diego Navarro Castaño. Aplicación de la teoría de restricciones (toc) a la gestión de facturación de las empresas sociales del estado, ese. *Innovar. Revista de Ciencias Administrativas y Sociales*, 16(27):91–100, 2006.
- [5] Andrei Borshchev and Alexei Filippov. From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: reasons, techniques, tools. In *Proceedings of the 22nd international conference of the system dynamics society*, volume 22. Citeseer, 2004.
- [6] Josefina Gutiérrez Martínez, Marco Antonio Núñez Gaona, and Ruth Evelyn Delgado Esquerre. Impacto del sistema pacs-inr en la calidad del servicio de imagenología. *Investigación en Discapacidad*, 1(1):18–24, 2012.
- [7] Transformando el proceso de interpretación radiológica: la iniciativa scar trip. In *Medical Imaging 2004: PACS and Imaging Informatics*.
- [8] Clínica del Country. Imágenes diagnósticas. <https://www.clinicadelcountry.com/clinica/servicio-imagenes-diagnosticas>, 2018. [En línea].
- [9] MV. Radiología digital: ¿qué cambia para el paciente y para la gestión? <http://www.mv.com.br/es/blog/radiologia-digital---que-cambia-para-el-paciente-y-para-la-gestionr>, 2019. [En línea].
- [10] R. Rincón Bermudez. Los indicadores de gestión organizacional: Una guía para su definición. *Revista Universidad EAFIT*, Julio-Septiembre 1998.

-
- [11] C. Pérez Jaramillo. Los indicadores de gestión. *Soporte y Cia Ltda*, 2010.
- [12] M Dotoli, MP Fanti, Giorgio Iacobellis, L Martino, AM Moretti, and Walter Ukovich. Modeling and management of a hospital department via petri nets. In *2010 IEEE Workshop on Health Care Management (WHCM)*, pages 1–6. IEEE, 2010.
- [13] Christos G Cassandras and Stephane Lafortune. *Introduction to discrete event systems*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [14] Desde la dinámica del sistema y el evento discreto hasta el modelado basado en agentes prácticos: razones, técnicas, herramientas. In *Actas de la 22ª conferencia internacional de la sociedad de dinámica de sistemas*.
- [15] James Lyle Peterson. *Petri net theory and the modeling of systems*. Prentice Hall PTR, 1981.
- [16] Joselito Medina Marín, Juan Carlos Seck Tuoh Mora, Norberto Hernández Romero, et al. Aplicación de redes de petri en la modelación de sistemas de eventos discretos. *PADI Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 1(1), 2013.
- [17] Sarah-Jane Whittaker, Karen Rudie, James McLellan, and Stefan Haar. Augmenting petri nets to model health-care protocols. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(12):331–336, 2010.
- [18] Abdul Rauf Khushk and Xiaozhong Li. Petri net methodology for solving healthcare management issues. In *ITM Web of Conferences*, volume 17, page 03030. EDP Sciences, 2018.
- [19] Redes de petri con recursos para modelar sistemas de atención primaria de salud. In *18a Conferencia Internacional 2014 sobre Teoría, Control y Computación de Sistemas (ICSTCC)*.
- [20] Irene Cruz Martínez, Alexander González Oliva, and Fernando Machado Acuña. Consideraciones sobre la implementación del imagis® para la interpretación de imágenes diagnósticas digitales con fines docentes en tecnología de la salud. *MediSan*, 17(7):2075–2078, 2013.
- [21] Ilse Raquel Raudales Díaz. Imágenes diagnósticas: Conceptos y generalidades. *Revista de la Facultad de Ciencias Médicas*, 2014.
- [22] Leonor Fuentes Puebla, Sonia Felipe Torres, and Víctor Valencia Fernández. Efectos biológicos de los rayo-x en la práctica de estomatología. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 14(3):337–347, 2015.

- [23] Bernike Pasveer. Knowledge of shadows: the introduction of x-ray images in medicine. *Sociology of Health & Illness*, 11(4):360–381, 1989.
- [24] Instituto Nacional de Bioingeniería e Imágenes Biomédicas. Rayos x. 2013.
- [25] Antonio José Salazar Gómez and Diana Katherine Cuervo Ramírez. Protocolo de ensayos de emisiones radiadas en equipos médicos: caso de estudio de equipos de telemedicina. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (65):33–45, 2012.
- [26] Tim Newman. ¿son realmente seguros los rayos x? <https://www.medicalnewstoday.com/articles/219970#what-are-x-rays>. [En línea].
- [27] María Gabriela Salazar Pisco. El impacto de las tecnologías (digitalización y teleradiología) en los recursos utilizados en el servicio médico del departamento de imágenes médicas del centro clínico quirúrgico ambulatorio hospital del día efrén jurado lópez. 2019.
- [28] Clinical Radiology. Standards for the provision of teleradiology within the united kingdom. Technical report, 2016.
- [29] American College of Radiology. Acr technical standard for teleradiology. pages pp. 645–653, 2003.
- [30] Helena Benítez Meneses. Experiencia del seguro social colombiano en teleradiología. *Revista de Salud Pública*, 3:191–193, 2001.
- [31] L Martí-Bonmatí, A Morales, and L Donoso Bach. Hacia un uso adecuado de la teleradiología. *Radiología*, 54(2):115–123, 2012.
- [32] Diana Cerinza Suescun, Gloria Marcela Ortiz Forero, et al. *Teleradiología: Un desafío para la especialidad en Colombia como estrategia para la mejora de los servicios de salud*. PhD thesis, Universidad del Rosario, 2017.
- [33] Jesús Beltrán. Indicadores de gestión herramientas para lograr la competitividad”. 2da. Edición. Editores Colombia, 2000.
- [34] Cruz Lezama. Indicadores de gestión. Recuperado de <https://docplayer.es/49436198-Indicadores-de-gestion-cruz-lezama-osain.html>, 2007.
- [35] M Cárdenas, F Cortes, A Escobar, S Nahmad, J Scott, and G Teruel. Manual para el diseño y la construcción de indicadores. *Instrumentos principales para el monitoreo de programas sociales de México. Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social, CONEVAL*, 2013.

- [36] Leudis Orlando Vega-de la Cruz, Yosvani O Lao León, and Milagros Pérez Pravia. Redes de petri en la determinación de puntos críticos para el control interno. *Revista Universidad y Sociedad*, 8(4):219–226, 2016.
- [37] Luis Diego Murillo. Redes de petri: Modelado e implementación de algoritmos para autómatas programables. *Tecnología en Marcha*, 21(4):102–125, 2008.
- [38] Modelado con redes de petri e implementación con grafcet de un sistema de fabricación flexible con procesos concurrentes y recursos compartidos. *Ciencia e Ingeniería en Neogranadina*.
- [39] Octavian Pastravanu, Mihaela-Hanako Matcovschi, and Cristian Mahulea. Petri net toolbox—teaching discrete event systems under matlab. In *Advances in Automatic Control*, pages 247–255. Springer, 2004.
- [40] Petri net toolbox at a first glance. <http://www.pntool.ac.tuiasi.ro/help/index.html>. [En línea].
- [41] Gh. Asachi Technical University of Iasi Mathworks. Petri net toolbox. https://la.mathworks.com/products/connections/product_detail/petri-net-toolbox.html. [En línea].
- [42] DICOM Library. Modalidad. <https://www.dicomlibrary.com/>. [En línea].
- [43] Stacy Goergen Ben O’Sullivan. Radiografía simple / rayos x. <https://www.insideradiology.com.au/plain-radiograph-x-ray/>. [En línea].