

# Evaluación de reglas de prioridad para la programación de cirugías en ambientes con limitada disponibilidad de recursos

An evaluation of heuristic rules for operating room scheduling in environments with limited resources

Carolina Saavedra Moreno<sup>1</sup>, Fabián Castaño<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Programa de Ingeniería Industrial, GINNOVA, Universidad de Ibagué, Ibagué - Colombia

<sup>2</sup>Facultad de Administración, Universidad de los Andes, Bogotá - Colombia

Correo-e: [carolina.saavedra@unibague.edu.co](mailto:carolina.saavedra@unibague.edu.co); [fa.castano47@uniandes.edu.co](mailto:fa.castano47@uniandes.edu.co)

**Resumen**— En este artículo se evalúan diferentes estrategias para la programación de cirugías mediante el uso de simulación de eventos discretos. El objetivo es determinar la pertinencia de su uso en una institución de salud con fuertes limitaciones en su disponibilidad de personal especializado. Se propone la adopción de bloques operatorios para la programación de las cirugías con mayor demanda y se demuestra que su uso puede mejorar notoriamente la oportunidad de atención si se combina con la regla de prioridad adecuada. Los resultados parecen indicar que las mejoras ocurren gracias a que se reduce el efecto de las, a veces difíciles, tareas de sincronización de las actividades de los médicos y la disponibilidad de las salas.

**Palabras clave**— Programación de cirugías, programación por bloques, reglas de prioridad, simulación

**Abstract**— This paper studies the adoption of simple rules of thumb for scheduling surgeries in a health care institution with limited availability of specialized personnel. Discrete events systems simulation is used with the goal of identify the one that is the most appropriate to be used to improve opportunity and operating room theatres utilization. It is also studied the use of dedicated operating blocks, that are used only to allocate most demanded surgeries, and it is demonstrated that this strategy might be able to improve systems performance when combined with an appropriate dispatching rule. Results suggest that this is because, compared to the current situation, the effect of pressures on the negotiation with the outsourced personnel is reduced.

**Key Words** — surgeries scheduling, block programming, priority rules, simulation.

## I. INTRODUCCIÓN

La programación de cirugías en las instituciones de salud colombianas, al igual que en muchos países, está sujeta a una gran cantidad de condiciones y restricciones que limitan su

eficiencia y eficacia. Algunos de estos problemas son la escasa disponibilidad de presupuesto para su operación y, en muchos casos, la disponibilidad de personal especialista, un problema especialmente notorio en las ciudades medianas y pequeñas. Una consecuencia de esto es que la capacidad de las instituciones de salud para dar respuesta en forma oportuna y apropiada a los requerimientos de la población objetivo se ve limitada [1]. Además, es posible encontrar que tanto en instituciones de salud públicas como privadas existen aún deficiencias en cuanto a la disponibilidad de plataformas tecnológicas para llevar a cabo actividades como la planeación de recursos, la programación de personal y la gestión de los recursos de la institución, especialmente cuando se trata de aquellos que no se consideran vitales para la operación de la institución [2].

Algunas cifras recientes indican que en Colombia, al igual que muchos países en condiciones similares, existe un claro déficit de especialistas en el área de la salud. De este hecho se deriva que alrededor de un 55% de hospitales no cuentan con la disponibilidad de médicos que se necesitan para satisfacer su potencial demanda [1]. Como consecuencia, los pocos especialistas deben ser compartidos entre diferentes instituciones de salud bajo esquemas de contratación a destajo, es decir, se les paga por cada servicio prestado a la institución. En este modelo los médicos no trabajan de manera permanente en ninguna institución, no se cuenta con su disponibilidad completa y, en muchos casos, las instituciones deben adaptarse a la disponibilidad de tiempo y horario que ellos definen.

Los problemas anteriormente mencionados son aún más graves en las ciudades intermedias, pues, según algunas estadísticas, el 80% de los especialistas se encuentran concentrados en las tres áreas metropolitanas más grandes de Colombia: Bogotá, Medellín y Cali [1]. Bajo esta realidad las instituciones de

Referencia	Periodo			Tipo de técnica				Bloques Operatorios		Duración Aleatoria		Tipo de Planeación	
	Diario	Semanal	Mensual	Programación Entera o Mixta	Metaheurísticas	Heurísticas o Reglas de Despacho	Otra	Sí	No	Sí	No	Off-line	On-line
[3]		x	x			x		x		x			x
[5]	x						x			x		x	
[6]	x			x							x	x	
[7]	x					x		x		x		x	x
[8]	x			x			x		x		x	x	
[9]			x	x					x		x	x	
[10]	x			x				x			x	x	
[11]			x	x				x		x		x	
[12]		x		x							x	x	
[13]		x		x					x		x	x	
[14]	x						x	x		x		x	x
[15]		x	x	x		x		x	x		x		x
[16]	x			x	x				x		x	x	
[17]	x				x				x		x	x	

Tabla 1. Características consideradas y enfoques de solución en la literatura relevante.

salud se enfrentan a diversos problemas a la hora de programar la utilización de sus recursos, lo que conlleva finalmente a bajos niveles de utilización de las salas, desperdicios en el uso del limitado tiempo del personal médico y demoras en la atención de los pacientes.

Con el fin de mejorar la programación de cirugías, es posible adaptar estrategias y plataformas tecnológicas que faciliten la tarea; no obstante, no todas las instituciones cuentan con los recursos económicos necesarios ya sea para adquirir paquetes de software o para lograr su apropiada implementación dentro de las mismas. De igual forma, dada la limitada disponibilidad de personal médico especializado, algunas instituciones se enfrentan a situaciones más complejas, en las que la adopción de reglas sencillas para la programación de las cirugías bajo las condiciones dadas corresponde a la única opción aplicable. Desde esta perspectiva, es importante determinar una forma adecuada de llevar a cabo dicha programación para mejorar indicadores de calidad como la oportunidad de la atención, *i.e.* el tiempo desde que el paciente solicita su procedimiento hasta que es programado, y la utilización de las salas, que en muchos casos puede ser rentada para la prestación de servicios por parte de privados, no pertenecientes a la institución.

En este artículo se explora el uso de reglas de prioridad de aplicación sencilla para instituciones que cuentan con limitaciones en su disponibilidad de personal especializado y en recursos tecnológicos que faciliten dicho proceso. Se presentan los resultados de la simulación de estrategias adaptadas de reglas de prioridad *on-line* y *off-line* teóricas, utilizadas con el fin de evaluar su pertinencia en el caso estudiado. El énfasis del trabajo se centró en la determinación de un esquema de asignación de salas de cirugía para la institución estudiada y no pretende, de ninguna forma, dar solución a problemas genéricos de la programación de cirugías.

El artículo está estructurado en 4 secciones. La Sección II, presenta brevemente algunos resultados recientes en términos de programación de cirugías, analiza los elementos básicos considerados y las tendencias en la adopción de estas estrategias. En la Sección III se describe el caso específico de una institución colombiana, señalando los detalles de su

operación e indicando la selección de estrategias de programación utilizadas para mejorar las métricas definidas al igual que el método utilizado para la realización del estudio. En la Sección IV se describen los detalles experimentales y se resumen y discuten los resultados obtenidos. Finalmente, las conclusiones del estudio se presentan en la Sección V.

## II. PROGRAMACIÓN DE CIRUGÍAS

El problema de programación y asignación de cirugías consiste en la determinación de la fecha y hora de realización de las cirugías, de tal manera que se sincronice de forma adecuada la disponibilidad del personal, de equipos y tecnología requerida para la realización de los procedimientos quirúrgicos [3]. Este es un problema que ha sido ampliamente estudiado en la literatura, usando diversos métodos, de acuerdo con los niveles de decisión involucrados (Estratégico, Táctico y Operativo), los cuáles determinan el nivel de complejidad metodológica y el alcance de los resultados esperados [4]. En el nivel *estratégico* el objetivo es definir la oferta general de cirugías del hospital con sus correspondientes recursos, atendiendo la demanda global estimada y teniendo en cuenta restricciones usualmente relacionadas con la disponibilidad de presupuesto. A nivel *táctico* se pretende desarrollar un programa maestro de cirugías, en el que se define el horario de funcionamiento y se determinan los cirujanos o equipos quirúrgicos con prioridad en periodos de tiempo en cada sala. Finalmente, en el nivel *operativo*, se establecen las secuencias y se asignan las cirugías para su atención en los espacios programados para un periodo de tiempo corto [5].

En este artículo se abordan decisiones en los niveles táctico y operativo, en donde a diferencia de las estratégicas, la consideración explícita del recurso médico juega un papel central. Esto se debe a que, con el propósito de aproximar la programación de las cirugías a los escenarios reales, puede llegar a requerirse la consideración de las especificidades que dependen de estos, por ejemplo su experiencia en la ejecución de un procedimiento dado [6]. Sin pretender ser una revisión exhaustiva, la Tabla 1 resume algunas características consideradas en la literatura de programación de cirugías en los niveles táctico y operativo.

Una posible distinción, que caracteriza los métodos diseñados para resolver el programa de cirugías está relacionada con el horizonte de planeación considerado. Teniendo en cuenta la dificultad para anticipar la demanda de cirugías, es particularmente común que se consideren horizontes temporales cortos de días o semanas [5], [6], [8], [16]. Pulido *et al.* [6], por ejemplo, abordan el problema de programación de cirugías en horizontes de hasta un día considerando entre otros aspectos, la experticia del personal médico que realizará la cirugía en cada procedimiento. Los autores proponen un modelo de programación entera que balancea los costos asociados con el tiempo de espera o extra, la subutilización de la sala y el costo de espera del personal médico. Para el mismo horizonte de planeación, Zhao & Li [8] estudiaron tres tipos de decisiones entrelazadas: (i) cantidad de quirófanos que se deben usar, (ii) la asignación de cirugías a cada uno de ellos y, (iii) la secuencia de cirugías en cada quirófano. El modelo propuesto considera cirugías ambulatorias electivas, teniendo en cuenta los tiempos de preparación entre las cirugías y las restricciones de los tipos de cirugía que pueden realizarse en el mismo quirófano.

Dexter y Traub [3] estudiaron el efecto de la asignación de cirugías en un hospital que atiende cirugías no urgentes tras la adopción de reglas simples. Los autores consideran horizontes de tiempo de un par de días, en los cuales las cirugías se adaptan a los espacios disponibles de acuerdo con la disponibilidad de tiempo en las salas y a otros criterios como fecha de inicio o finalización esperada. Los autores sugieren que existe una lógica para seleccionar tales reglas que deben ser estudiadas de acuerdo a las condiciones propias de los hospitales. Además, refieren que aspectos como la aleatoriedad, el momento de solicitar una cirugía y la actual utilización de las salas pueden, en efecto, tener consecuencias sobre la ejecución y flexibilidad de la programación.

Aquellos enfoques de programación de cirugías que consideran horizontes de planeación más largos suelen, a su vez, considerar la inclusión de bloques operatorios. Estos bloques se definen como un espacio asignado a un determinado propósito y con el fin de mejorar los procesos de atención [5], [10], [12], [14].

Fei *et al.* [12] diseñaron un programa de cirugía semanal para los quirófanos en el cual el tiempo de los bloques está reservado previamente para los cirujanos en lugar de para las especialidades (se usa una estrategia de programación abierta, es decir, ningún cirujano puede decidir el orden final de las cirugías). El proceso se compone de dos fases. Primero, se define la fecha de la cirugía y se asigna un quirófano. Luego se realiza la secuenciación de las cirugías en cada sala teniendo en cuenta la disponibilidad de camas para la recuperación de los pacientes. Un enfoque similar es explorado por Herring & Herrman [5], quienes consideran el uso de bloques definidos como asignación de tiempo reservada para la asignación de cirugías críticas, con una alta prioridad.

De forma similar, Zenteno *et al.*, [14] describen el diseño e implementación de una estrategia de bloques abiertos en el cual los bloques de quirófano se reservaron para pacientes no electivos (de un departamento de emergencias programados en listas de espera teniendo en cuenta la prioridad de atención (triage)) durante el horario laboral normal (horario de máxima demanda). De acuerdo con los autores, la adopción de bloques abiertos combinados puede acortar los tiempos de espera para los casos quirúrgicos no electivos.

Conforme se descende en el nivel de decisión mayor es la complejidad del problema y, asimismo, de los modelos usados para dar respuesta a los requerimientos de programación. Esto es especialmente notorio si se pretende dar elevados niveles de detalle al modelo utilizado para representar el problema. En su mayoría, los estudios analizados proponen modelos de programación lineal entera o mixta para dar respuesta a este requerimiento y métodos heurísticos que arrojan soluciones aproximadas en un tiempo prudencial.

Fei *et al.* [12] plantean un modelo de programación entera basado en el conocido *set partitioning* que se resuelve mediante un procedimiento heurístico basado en generación de columnas. Por otro lado, un modelo de programación entero mixto no lineal y un modelo de Programación por Restricciones (CP) son propuestos por Zhao & Li [8] para resolver un problema de programación de cirugías. Los autores consideran la búsqueda de aquellas soluciones que minimicen los costos fijos y los costos de horas extras por uso de los quirófanos. Guido & Conforti [10] plantean un modelo de programación lineal entera multiobjetivo que se soluciona con un algoritmo genético híbrido. De forma similar, Latorre-Núñez [16] propone un modelo de programación entera que considera aspectos como disponibilidad de los quirófanos, la recuperación posterior a la anestesia, los recursos requeridos por la cirugía y la posible interrupción del programa por procedimientos de emergencia. De acuerdo con los autores, el problema es NP-HARD, por lo que recurrir al uso de metaheurísticas es un paso natural (se presenta un algoritmo genético).

Molina-Pariente *et al.* [15] estudian el caso aplicado de programación de cirugías en un hospital, por medio de la implementación de heurísticas para asignar pacientes utilizando listas de espera con el ánimo de asignar una fecha de intervención y una sala de operaciones. Un gran número de heurísticas e instancias de prueba permiten a los autores una conclusión robusta sobre los mecanismos más apropiados para abordar el problema. El estudio se lleva a cabo con consideraciones de duraciones deterministas, utilizando como criterio de comparación los resultados obtenidos por las heurísticas, sin llegar a considerar la aleatoriedad en los tiempos de cirugía.

Aunque los resultados obtenidos a través de las técnicas estudiadas sugieren que es viable la optimización del proceso de programación de cirugías, todavía es poco común encontrar que se consideren los componentes aleatorios intrínsecos al problema, como lo referencia Cardöen *et al.* [18] en su estudio de revisión de literatura. No obstante, es bien conocido que

tales consideraciones deben hacerse si se toma en cuenta que no hacerlo puede afectar significativamente el rendimiento del sistema [3], [6]. Herring y Herrman [5] por ejemplo sugieren que la información histórica de la demanda del hospital debe usarse como base para la planeación, por lo que este tópico requiere ser revisado en detalle.

Con el fin de considerar la aleatoriedad en los diferentes procesos asociados a los procesos quirúrgicos es común encontrar que se utilicen dos enfoques. El primero es una consideración implícita de los componentes aleatorios en la estrategia de programación usando métodos como optimización robusta y programación estocástica [5]. Por otro lado, es común encontrar que se utilicen esquemas deterministas que posteriormente son evaluados mediante simulaciones numéricas con el fin de evaluar su adaptabilidad a los casos estudiados [3], [9], [14].

Desarrollos informáticos a la medida de la institución que los demanda e incluso algunas generales ampliamente conocidos en la industria como los integrados en los ERP son a menudo adoptados por instituciones que cuentan con los recursos económicos, humanos y tecnológicos para su implementación. No obstante, la diversidad de modelos y características consideradas en la literatura sugiere que es interesante la construcción de desarrollos hechos a la medida. Lo anterior es una consecuencia del hecho que, en salud, cada institución puede operar bajo esquemas muy diferentes lo que, consecuentemente, limita la aplicabilidad de desarrollos de tipo genérico.

Diversas estrategias pueden ser utilizadas para la programación de las salas de cirugía que pueden diferir enormemente en su aplicación y que pueden requerir de tecnologías más o menos sofisticadas para su adopción. Existen las llamadas metodologías *on-line*, que se llevan a cabo en tiempo real, en las que se asignan las fechas, salas y horas de inicio de la cirugía inmediatamente. Por otro lado, otros métodos se aplican a partir de listas de espera (*off-line*), en donde el paciente debe esperar a la confirmación de la realización de la cirugía. En este enfoque una cirugía es programada por la institución una vez se cuenta con una base de solicitudes lo suficientemente grande para dar paso a una programación que utilice de forma más adecuada los recursos [19].

Teniendo en cuenta la anterior clasificación esta investigación vincula elementos estocásticos ligados a las características de la demanda y el estudio de cirugías electivas, mediante el uso de simulación de eventos discretos y la implementación de reglas de prioridad *off-line* y *on-line*. El foco central es la determinación de reglas de programación que permitan mejorar algunas medidas de rendimiento relacionadas con el proceso de asignación de citas, sin considerar directamente el efecto de eventos adversos aleatorios al momento de ejecución de los procedimientos quirúrgicos.

### III. CASO DE ESTUDIO

El objeto de estudio, es el área de cirugías de un hospital de tercer nivel privado, que atiende servicios de salud de alta complejidad, ubicado en una ciudad intermedia de Colombia. Esta área tiene una importante participación en los ingresos de la institución, por atender procedimientos especializados y realizar, además, cirugías estéticas. Esta clínica cuenta con un número muy limitado de médicos especialistas contratados directamente por la institución. Como consecuencia, y además de la limitada disponibilidad de especialistas en la región, la institución usualmente debe adaptarse a los horarios disponibles por parte de este personal y no necesariamente éstos a las necesidades de la institución.

La institución estudiada carece además de herramientas tecnológicas apropiadas para realizar algunas de las tareas de planeación y programación de recursos. Esta realidad evidencia la necesidad de proponer reglas de secuenciación y esquemas de programación y asignación de cirugías simples, de tal forma que el personal a cargo de dichas tareas lo pueda llevar a cabo sin requerir de sofisticadas herramientas tecnológicas ni inversiones en tecnologías para apoyarlo. De esta forma, se espera que este tipo de esquemas pueda ayudar a responder de forma muy rápida a las muy sentidas necesidades de la institución en cuanto a mejorar el proceso de planeación de capacidad y programación de las cirugías, para mejorar el grado de utilización de las salas y el indicador de oportunidad de atención.

El servicio de cirugías atiende intervenciones quirúrgicas en cirugía general, cardiovascular, plástica estética, plástica reconstructiva, cirugía de mano, vascular, ortopedia, urología, neurocirugía, neumología, otorrinolaringología, gastroenterología, cirugía de tórax, ginecología y cirugía pediátrica. El área de quirófanos cuenta con dos salas utilizadas para hacer todos los procedimientos que ofrece la clínica, excepto los de cirugía cardiovascular los cuales se desarrollan exclusivamente en una sala particular diferente a las demás.

Con respecto a los especialistas, en el periodo de estudio la clínica contaba con dos cirujanos cardiovasculares con contrato laboral y 20 médicos especialistas con contrato de adscripción, modalidad que consiste en el pago de una remuneración con base a la cantidad de cirugías que el médico especialista realiza en un periodo de tiempo y sin que ello genere un contrato laboral. En general el proceso del servicio de cirugías consta de las siguientes etapas: admisión del paciente, programación de la cirugía, la intervención quirúrgica, la recuperación postquirúrgica, el proceso de facturación y el egreso del paciente.

En la fase de programación de la cirugía se define la fecha y hora de realización de la intervención quirúrgica. Este proceso manual que se hace actualmente de manera *on-line* tiene en cuenta principalmente la disponibilidad de tiempo del cirujano y el orden de llegada de los pacientes. No obstante, la hora y fecha final depende de cómo se concreta un acuerdo entre el cirujano y la persona encargada de realizar la programación de

los quirófanos, teniendo en cuenta la disponibilidad de la sala, del anestesiólogo y el médico general de turno que apoyan el servicio. En la determinación de fecha y hora con el médico especialista, él define cuál es el tiempo de duración de la cirugía que se debe reservar en la programación.

### A. Metodología

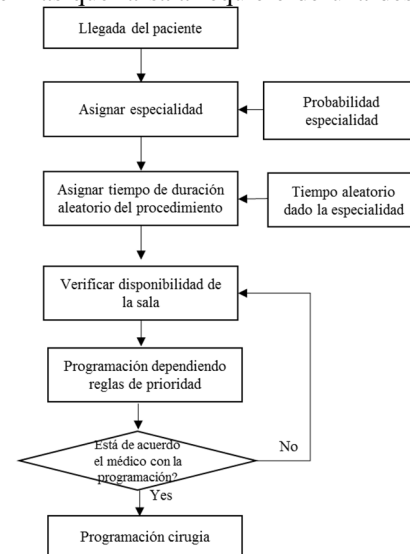
La metodología para el desarrollo de esta investigación se ejecutó en dos fases. En primer lugar se llevó a cabo una caracterización del sistema, que buscaba identificar las características de la demanda atendida por la institución, los procedimientos realizados y las duraciones de estos. Se documentó el proceso de programación actual a partir del análisis de información registrada en los libros de programación del periodo entre Enero 2013 y Septiembre de 2014. Los datos comprenden la información de todos los procedimientos que se llevaron a cabo, la programación asignada para la realización de los procedimientos y la hora de inicio y fin de las cirugías (incluyendo anestesia y operación). Con esta información, se analizó el comportamiento de la demanda por los diferentes servicios quirúrgicos que ofrece la institución. También se tuvieron en cuenta consideraciones del número de procedimientos que se llevaron a cabo, con el fin de determinar la proporción de la demanda por los diferentes procedimientos que recibe la institución y el tiempo que debería dedicarse a atender cada una de estas especialidades.

La segunda fase contempló la determinación y evaluación de estrategias de programación *off-line* y *on-line* para mejorar el proceso de programación ante las condiciones que presenta la institución estudiada. Además, se evaluó la utilización de bloques quirúrgicos teniendo en cuenta la variación en la tasa de demanda. Finalmente se construyó un modelo de simulación de eventos discretos para replicar tanto la forma en la que se lleva a cabo la programación actual en la institución como para evaluar el rendimiento de los diversos escenarios de mejora propuestos.

### B. Modelo actual de programación de las cirugías

La Figura 1 representa el modelo conceptual de la simulación realizada. El proceso inicia con la llegada de una solicitud de programación, generada de acuerdo a la demanda histórica de las diferentes especialidades para las cuales se realizan procedimientos quirúrgicos en la institución. Acto seguido, se determina la duración del procedimiento de forma aleatoria y respondiendo a las características de duración estimada de acuerdo con la especialidad a la que corresponde. Una vez conocida esta información, análoga a la información suministrada por el personal médico previo a la programación, se verifica la disponibilidad de tiempo en la sala, y se confronta con los espacios de tiempo disponibles suministrados por los médicos cuando esta información se conoce. Si no se dispone de esta información, se realiza una comunicación con el especialista que decide si puede atender la cita en un momento dado, un proceso que se repite hasta que tanto la agenda brindada por el especialista como la programación en alguna de las salas tenga disponibilidad simultánea. Este proceso se

modela asociando una probabilidad de rechazo al ofrecimiento de la institución y dependiendo de dicha respuesta se programa la cirugía o se verifica nuevamente la disponibilidad de los quirófanos. Para la programación se tuvo en cuenta dentro de los tiempos de alistamiento y liberación de los quirófanos el tipo de cirugía a realizar; puesto que existen cirugías limpias, en las que no hay elevado riesgo de contaminación en las salas, y sucias en las que la sala requiere de una descontaminación



antes de iniciar otro procedimiento.

Fig 1. Modelo conceptual del proceso de programación de cirugías

### C. Escenarios de programación propuestos

En la Tabla 2 se presenta una descripción de las características de cada alternativa propuesta para la programación de las cirugías. Para el diseño de las alternativas se consideró, de acuerdo con las posibilidades de la institución, el uso de reglas de prioridad teóricas para determinar la disciplina de programación de las solicitudes, la metodología de programación y el uso de bloques operatorios.

Las reglas de prioridad teóricas que se tuvieron en cuenta por ser de fácil implementación y adecuadas al contexto de la institución estudiada fueron [15], [20]-[22]:

- **First fit:** Se programa la cirugía en la primera sala que cuente con tiempo disponible
- **Best fit:** Se programa la cirugía en la sala que cuente simultáneamente con tiempo suficiente para acomodarla pero tenga el menor tiempo disponible de entre las posibles opciones.

Se evaluaron escenarios *on-line* (modelo de programación actual de la institución) y escenarios *off-line* conformando listas de espera durante cortos periodos de tiempo. De esta forma se espera determinar las combinaciones que dan lugar a mejoras en los indicadores relacionados con la programación de las cirugías mediante una mejor utilización de los espacios de tiempo y los recursos humanos. El registro de lista de espera

quirúrgica se conformó por todos los pacientes electivos, es decir se omitieron los procedimientos de urgencia, pues en general son disruptivos e implican posibles reprogramaciones en los cronogramas establecidos. Las listas de espera se ordenaron de forma creciente o decreciente. La primera tiene como preferencia programar primero las cirugías que requieren un menor tiempo, mientras que en el orden decreciente encabezan la lista a programar las cirugías de mayor duración. Además, se evaluó la implementación de “bloques operatorios”. En este sentido, se entiende por “bloque” a una franja de tiempo reservado en un espacio (sitio), que en este caso serían los quirófanos, para la programación de la demanda asociada a un conjunto particular de especialidades médicas. La consideración de estos bloques se da gracias al hecho que la institución puede mejorar su negociación con el personal que atiende las especialidades de mayor demanda en aras de mejorar sus indicadores de rendimiento. Este mecanismo se utiliza con el fin de organizar el horario de la clínica con respecto a la programación de las especialidades de mayor demanda, facilitar la programación al menos en estos espacios, y determinar la importancia de llegar a mejores arreglos en términos de negociación con los especialistas que ofrecen sus servicios a la institución.

Así, de acuerdo con la información histórica, se escogieron las tres especialidades de mayor demanda para su programación mediante bloques operatorios: cirugía plástica, ortopedia y cirugía general. La asignación del tiempo total disponible para la creación de los bloques se hizo de forma proporcional a la cantidad de tiempo de cirugía consumido en el año de información disponible para las tres especialidades seleccionadas. Posteriormente, los bloques se asignaron de acuerdo con la disponibilidad de las salas.

Escenario	Disciplina de atención de solicitudes	On-line vs. Off-line	Orden	Bloques Operatorios
1	First Fit	On-Line	FIFO	No
2	First Fit	On-Line	FIFO	Sí
3	First Fit	Off-Line	FIFO	No
4	First Fit	Off-Line	Dec	Sí
5	First Fit	Off-Line	Cre	Sí
6	Best Fit	On-Line	-	Sí
7	Best Fit	Off-Line	Dec	Sí
8	Best Fit	Off-Line	Cre	Sí

Tabla 2. Escenarios de programación propuestos

En cada escenario se evaluaron dos indicadores de desempeño: utilización de los quirófanos, medido como la proporción del tiempo utilizado respecto al disponible, y el indicador de oportunidad en la asignación de cirugías. Para cada solicitud, la oportunidad se define como el intervalo de tiempo (en días) que transcurre desde que se solicita el servicio de cirugía hasta el momento en que, en efecto, el servicio se ejecuta. En particular, considerando el alcance de este proyecto, esta definición es actualizada para considerar exclusivamente el intervalo desde que se solicita hasta la fecha de programación, omitiendo detalles fuera del alcance como los pacientes (o médicos que no

## IV. RESULTADOS

### A. Caracterización del servicio de cirugías

En el periodo de estudio en el servicio de cirugías se atendió principalmente pacientes electivos (ambulatorios y hospitalizados), solo el 13% de los ingresos atendidos fueron pacientes de urgencia (ver Figura 2).

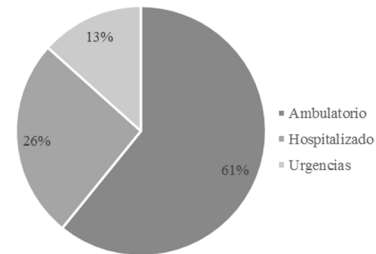


Fig 2. Tipo de paciente (Enero 2013 - Septiembre de 2014)

La especialidad más demandada en el sistema es la cirugía plástica. Durante el periodo de análisis se encontró que del total de tiempo de utilización de las salas aproximadamente el 65% fue utilizado para realizar cirugías plásticas, seguido de ortopedia y cirugía general con un 9% y 8% respectivamente (ver Figura 2).

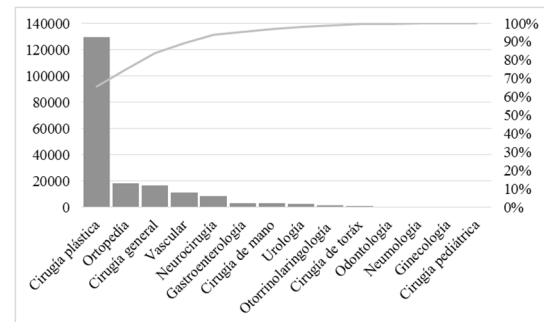


Fig 3. Total de minutos demandados por especialidades (Enero 2013 - Septiembre de 2014)

En la Tabla 3 se presentan las distribuciones de probabilidad que se utilizaron para caracterizar la variable duración de cirugía por especialidad. En la clínica se realizan cirugías plásticas reconstructivas y estéticas, debido a que en los datos disponibles no se contó con la información necesaria para caracterizar de manera independiente cada uno de los tipos de cirugías, se recurrió a consulta de expertos para definir los valores mínimos y máximos de duración cada una de ellas. Por lo anterior, se definió para esta especialidad una distribución uniforme con los parámetros definidos por los expertos, asumiendo que el 50% de las cirugías plásticas realizadas son reconstructivas y el 50% son estéticas.

Con respecto a las especialidades vascular y otorrinolaringología se determinó la distribución de probabilidad por comité de expertos, puesto que las distribuciones teóricas conocidas fueron rechazadas en las pruebas de bondad de ajuste realizadas. Para las especialidades con las que se contó con menos de 30 datos para realizar los

análisis requeridos se definió la distribución por comité de en la actualidad se cuentan con poca información para

Especialid.	Distrib.	Parám.	Especialid	Distrib.	Parám.
Cirugía Plástica reconstruct.	U(10,120)	CE	Urología	Lognormal	$\sigma=0,66$ $\mu=3,59$
Cirugía Plástica estética	U( 40,180)		Otorrinolari	U(5, 120)	CE
Ortopedia	Weibull	$\alpha=2,07$ $\beta=83,26$	Cirugía de Mano	Lognormal	$\sigma=0,51$ $\mu=3,77$
Cirugía General	Gamma	$\alpha=3,24$ $\beta=25,64$	Cirugía de tórax	Normal	$\sigma=46,13$ $\mu=109,69$
Vascular	U (40,90)	CE	Neumología	Weibull	$\alpha=3,24$ $\beta=32,82$
Gastroentero.	Lognormal	$\sigma=0,46$ $\mu=3,43$	Cirugía pediátrica	U(60, 90)	CE
Neurocirugía	Weibull	$\alpha=1,46$ $\beta=106,9$	Ginecología	U(60, 180)	CE

CE: comité de expertos

Periodo de estudio: Enero 2013 - Septiembre de 2014

NR: no rechazado

Tabla 3. Variable duración de cirugía

expertos

## B. Modelo de simulación

Como se mencionó previamente, para la fase experimental que corresponde a la evaluación de los escenarios sugeridos, la construcción de la simulación adoptó el software de simulación Arena®.

El modelo de simulación adoptado representa de forma flexible las diferentes características consideradas en las diferentes alternativas planteadas como propuestas de mejora. Su alcance se limita a la fase de programación de cirugías y no considera los efectos propios de la aleatoriedad implícita al momento de la ejecución de la programación propuesto. La eficiencia se define en términos de horas subutilizadas de tiempo de las salas en combinación con elementos como la oportunidad de los servicios brindados. De esta forma, se busca con el modelo determinar la mejor estrategia de programación de los procedimientos quirúrgicos, considerando que la institución en la actualidad busca mejorar la eficiencia de sus esquemas de programación sin grandes inversiones en plataformas tecnológicas y considerando la limitada disponibilidad de personal médico y la influencia de su poder de negociación.

Para efectos de los análisis de las salidas del sistema, el modelo contempla una simulación de *estado estable*, esto puede justificarse sí se considera el hecho que las solicitudes que llegan al sistema deben siempre ser programadas en un horizonte de planeación largo y que dicha asignación puede tener efectos indeterminados sobre las futuras llegadas de solicitudes al sistema. Además, a diferencia de las simulaciones con terminación, el sistema que se modela continúa operando cada día bajo las condiciones de operación del día anterior.

Un primer grupo de experimentos demostró que el tiempo de ejecución del modelo generado para simulaciones de hasta 10 años fue lo suficientemente corto como para realizar simulaciones con múltiples réplicas. De esta forma se esperaba mejorar la precisión de los resultados obtenidos. Debido a que

determinar las condiciones iniciales del sistema se optó por dejar un periodo de calentamiento. Para este fin, se dividió cada réplica de la simulación en dos fases:

- Una fase de inicialización (periodo de calentamiento), del tiempo 0 al tiempo  $T_0$ .
- Una fase de recolección de datos, desde  $T_0$  hasta el tiempo de parada  $T_0+T_E$ .

Teniendo en cuenta la recomendación de [23] se seleccionó como tiempo de calentamiento  $T_0$  el 10% del tiempo total correspondiente a la simulación. Durante este periodo no se recogió información para la determinación de estadísticas del sistema para evitar los correspondientes sesgos de inicialización que podrían ser inducidos por las condiciones iniciales de la simulación. Además, se observó que probablemente debido a que el alcance del modelo no comprende los eventos considerados con el proceso operatorio en sí mismo, las fuentes de variabilidad son pocas y el sistema alcanza el estado estable rápidamente (ver Figura 4).

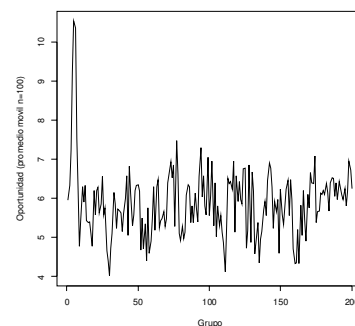


Figura 4. Oportunidad promedio para cada grupo de pacientes tras dividir los datos en  $n=200$  grupos.

Se ejecutó un primer conjunto de experimentos con el fin de determinar las condiciones adecuadas bajo las cuales analizar los resultados de la simulación. De esta forma, se esperaba contar con información útil en el propósito de fijar anchos específicos para la amplitud de los intervalos de confianza. Los resultados para la oportunidad en la asignación de las salas de cirugía se muestran en la Tabla 4. Las observaciones parecen indicar que, en general y bajo las consideraciones iniciales de operación del sistema, se obtienen intervalos de confianza de poca amplitud que rondan alrededor de un 0.16% sobre el valor de la media. Esto es probablemente, como se mencionó antes, consecuencia del hecho que las fuentes de variabilidad en el modelo son básicamente dos: i) la disponibilidad de los médicos y ii) la duración de las cirugías.

Escenario	Oportunidad Media	Semi-intervalo de confianza (95%)
1	5.732	+/- 0.00634
2	4.835	+/- 0.00769
3	5.739	+/- 0.00638
4	4.934	+/- 0.00799
5	4.941	+/- 0.00812
6	6.66	+/- 0.0133
7	6.7	+/- 0.0135
8	7.105	+/- 0.0148

Tabla 4. Resultados indicador de oportunidad en los diferentes escenarios

Los anteriores resultados indican que no es necesario incrementar el número de réplicas y ciertamente pueden llevarse a cabo análisis detallados con la información disponible. A continuación, se analizan en detalle los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios con base en el criterio oportunidad.

#### 4.3 Evaluación de escenarios de programación

En la Tabla 5 se presentan los resultados consolidados de las estadísticas de los indicadores de desempeño obtenidos en cada uno de los escenarios evaluados. Las observaciones generadas mediante la simulación del escenario 2 indican una notable mejora en el indicador de oportunidad de atención en comparación con las condiciones actuales. Con respecto al

Con respecto a los días de espera para realización de los procedimientos en cada escenario simulado, se observó que para el caso del escenario 1 (escenario actual) la distribución del tiempo que esperan los pacientes para ser atendidos es bastante asimétrica y tiene un pico alrededor de 3 días, bastante lejos de la mediana que se sitúa en 5.73 días (ver Figura 5). La información generada indica que bajo este escenario el 50% de los pacientes esperarían 5 días o menos y los restantes se distribuirían de forma no homogénea entre 5 y 39 días, siendo este el máximo valor encontrado en la simulación y validado con los expertos consultados en la institución.

Como se observa en la Figura 5, la distribución de los datos, en el escenario 2, muestra una fuerte asimetría en la cual existe una mayor concentración de los datos en el costado

escenario 3, en el que se presenta la posibilidad de mantener listas de espera sin modificar los tiempos de dedicación exclusivos de la sala, es decir sin bloques operatorios, se obtienen resultados similares a los observados en el escenario actual (escenario 1). De acuerdo con las observaciones obtenidas mediante la simulación, no existe una diferencia significativa entre la oportunidad que se obtiene al utilizar estas dos estrategias. La mayoría de medidas de rendimiento obtenidas muestran una clara semejanza que parece indicar que es poco interesante la adopción de este tipo de esquemas.

Los resultados muestran que la programación usando reglas del tipo Best Fit (*on-line* y *off-line*) puede conllevar a incrementar el indicador de oportunidad de atención. Lo anterior es interesante si se considera que este indicador está directamente vinculado con la percepción del usuario sobre la calidad del servicio que se presta. La explicación para este comportamiento está dado por el hecho que, mientras en la regla First Fit se concentra la programación en los días más cercanos, debido a que se programa en el primer espacio disponible que se ajusta al requerimiento, en el Best Fit se busca completar los bloques operatorios tanto como sea posible. No obstante, considerando que este es un sistema afectado por el tiempo, programar mediante reglas tipo Best Fit parece incrementar la probabilidad de dejar un bloque operatorio sin utilizar debido a que el criterio no le apunta directamente a este indicador y no necesariamente las nuevas demandas se ajustarán al espacio disponible en los días que se encuentran próximos por pasar y cuyo espacio no estará disponible nuevamente.

Escenario	Oportunidad promedio	Desviación estándar	% Utilización
1	5.73	3.19	57.4
2	4.83	3.84	54.8
3	5.73	3.19	57
4	4.93	4	56.6
5	4.94	4.06	54.5
6	6.65	6.65	60.1
7	6.7	6.79	58
8	7.01	7.4	61.1

Tabla 5. Indicadores de desempeño de cada escenario evaluado

izquierdo. Esto, en comparación con el escenario 1, indica que existen muchos menos pacientes que deben esperar grandes periodos por su procedimiento. Mientras que en el escenario actual hasta un 50% de los pacientes debería esperar tiempos inferiores a 5 días, el simple hecho de agregar bloques operatorios hace que ese mismo porcentaje de pacientes espere por periodos de hasta 3 días. Esto es quizá una consecuencia del hecho que la construcción de bloques permite usar de una forma más eficiente las salas, evitando retrasos en las cirugías con mayor demanda, lo cual seguramente afecta las estadísticas asociadas.

Los resultados muestran que tanto en los esquemas 4 y 5, como en el esquema 2, el tiempo máximo que un paciente puede esperar se incrementa en comparación con el esquema actual. Un efecto que puede ser explicado por la espera de



los procedimientos que no deben ser programados en los bloques operatorios y que, en periodos de alta demanda deberían esperar.

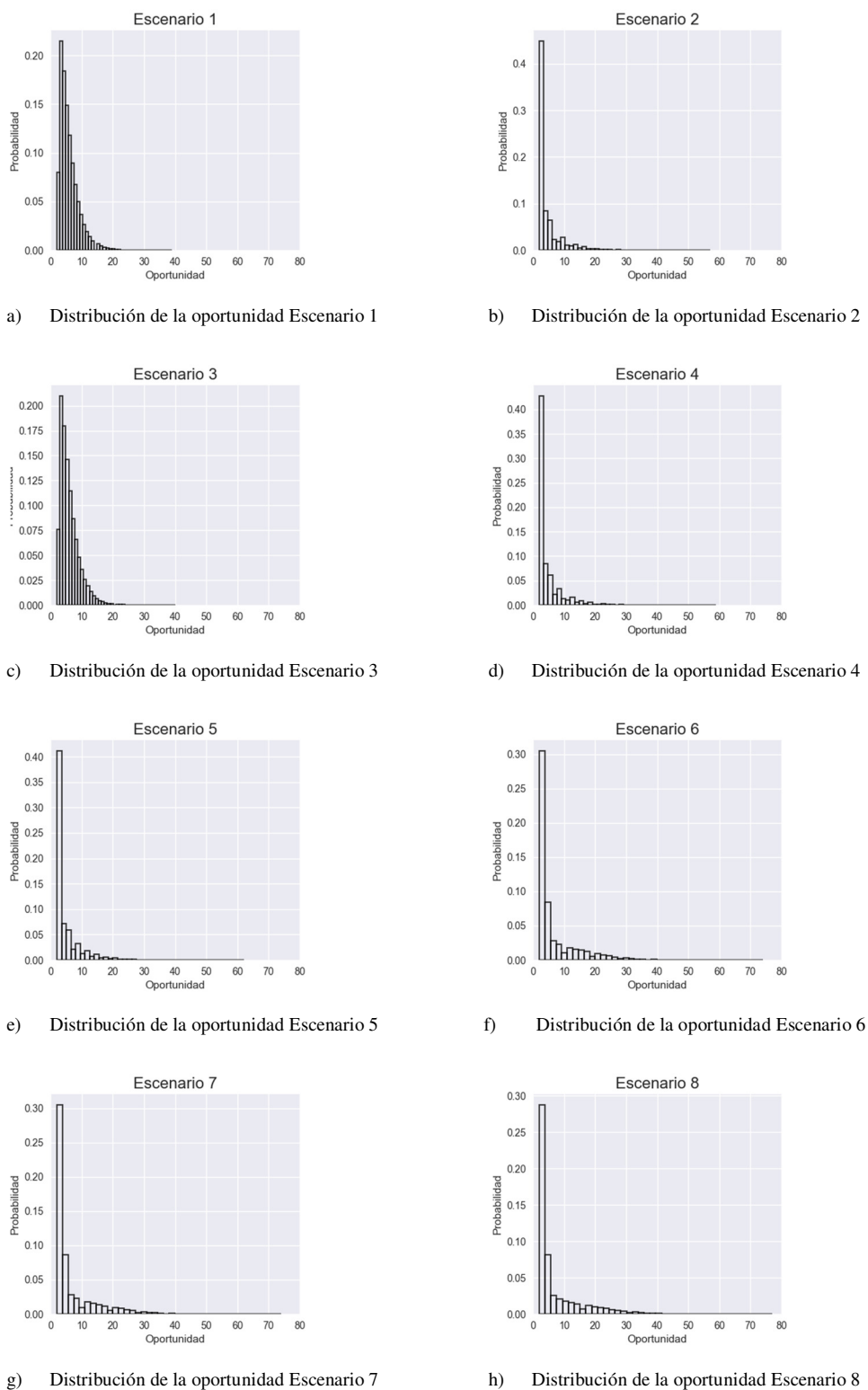


Fig 5. Días de espera para realización de procedimientos en cada escenario evaluado

Una comparación de los resultados en términos de la oportunidad y la utilización de las salas muestran que, bajo los esquemas propuestos, existe una cierta relación entre el porcentaje de utilización y el indicador de oportunidad de atención. Según se observa en la Figura 6, los escenarios simulados en los cuales se obtuvo una mejor (mayor) utilización de las salas, la oportunidad tiende a ser mayor, lo cual se refleja negativamente en los estándares de servicio deseados. En sentido opuesto, se observa que bajas utilidades conllevan a mejoras de la oportunidad, el objetivo y principal interés de los directivos de la institución.

Los resultados muestran que el uso de la regla de prioridad Best Fit incrementa el indicador de oportunidad de atención, ya que, la implementación de los bloques en las cirugías más demandadas mejora significativamente la oportunidad. La regla de prioridad que se usa con los bloques debe combinar adecuadamente para que marche como se espera. A diferencia de la situación actual, ya no es necesario negociar con el médico la fecha y hora de cirugía, sino que, por el contrario, estos parámetros ya están filtrados en los bloques operatorios. Así, se logra dar flexibilidad a la programación de cirugías de baja frecuencia, conociendo cuales son los espacios disponibles que no están asignados a las especialidades de alta demanda.

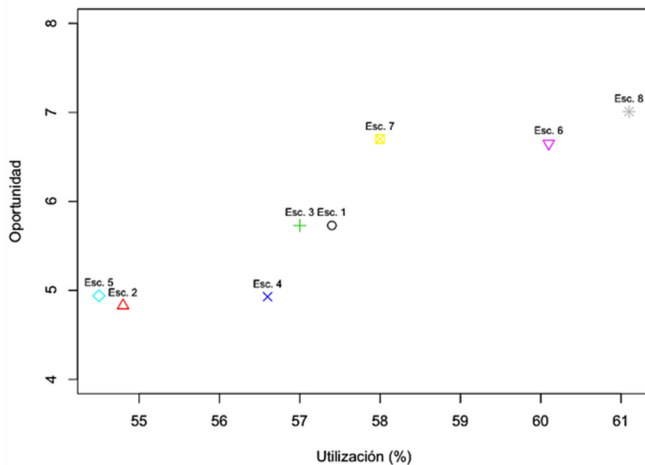


Fig 6. Relación entre el porcentaje de utilización de la sala y oportunidad de atención en cada escenario evaluado

## V. CONCLUSIONES

Este artículo evalúa mediante simulaciones numéricas la implementación de reglas de prioridad para la programación de cirugías en instituciones que no cuentan ni con las plataformas tecnológicas adecuadas ni con el personal de planta necesario para atender su demanda. El propósito, es determinar estrategias simples de programación que permitan mejorar la oportunidad de la atención y la utilización de las salas en condiciones de limitada disponibilidad de recursos. Los resultados indican que existe una clara ventaja en la utilización de bloques operatorios con el fin de bloquear el tiempo necesario para atender las cirugías de mayor demanda evitando así que estas compitan por recursos frente a cirugías que, teniendo baja demanda, puedan hacer más difícil e ineficiente la programación en las salas disponibles.

esta regla busca utilizar los bloques operatorios tanto como sea posible, teniendo como desventaja el hecho que puede dejar bloques vacíos en los días que van pasando, en espera de un procedimiento que mejore la utilización de las salas en un día dado y que, por desgracia, podría no llegar. Posteriormente, conforme avanza el tiempo es posible que algunos días con baja utilización pasen y posteriormente no se podrán utilizar. Esta regla no favorece el nivel de servicio, puesto que los pacientes presentan un grado alto de preferencia por ser atendidos cuanto antes. El esquema First Fit, por su parte, tiende normalmente a programar en los días más cercanos a la fecha de la solicitud, llenando todos los espacios disponibles en el presente, es decir, bloques que pueden ser usados en el momento que se necesitan.

El presente artículo presenta una aproximación sencilla a un problema muy común en contextos como el colombiano en el cual, en ocasiones, son requeridas soluciones temporales mientras se cuenta con recursos apropiados para dar una solución definitiva al problema. No obstante, en futuras investigaciones se considerará la posibilidad de desarrollar herramientas de apoyo a la decisión que permitan dar una mejor solución al problema. Además, es importante ampliar el alcance de esta investigación vinculando elementos propios de la ejecución de los procedimientos quirúrgicos como reprogramaciones y los retrasos y cancelaciones de los médicos especialistas, así como el efecto de los pacientes de urgencia en el sistema.

## REFERENCIAS

- [1] J. Amaya, *et al.*, "Estudio de disponibilidad y distribución de la oferta de médicos especialistas, en servicios de alta y mediana complejidad en Colombia.," Bogotá, 2013.
- [2] N. Velasco, *et al.*, "Logística hospitalaria: lecciones y retos para Colombia," in *La salud en Colombia: logros, retos y recomendaciones*, Universidad de los Andes., Bogotá, Colombia, 2012, p. 576.
- [3] F. Dexter and R. D. Traub, "How to Schedule Elective Surgical Cases into Specific Operating Rooms to Maximize the Efficiency of Use of Operating Room Time," *Anesth Analg*, vol. 94, pp. 933–942, 2002.
- [4] S. Choi and W. E. Wilhelm, "On capacity allocation for operating rooms," *Comput. Oper. Res.*, vol. 44, pp. 174–184, 2014.
- [5] W. L. Herring and J. W. Herrmann, "A stochastic dynamic program for the single-day surgery scheduling problem A stochastic dynamic program for the single-day surgery scheduling problem," *IIIE Trans. Healthc. Syst. Eng.*, vol. 1, pp. 213–225, 2011.
- [6] R. Pulido, *et al.*, "Managing daily surgery schedules in a teaching hospital: a mixed-integer optimization approach," *BMC Health Services Research*, vol. 14, no. 464, pp. 1–13, 2014.
- [7] R. M. Hallah and A. H. Al-Roomi, "The planning and scheduling of operating rooms: A simulation approach," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 78, pp. 235–248, 2014.

- [8] Z. Zhao and X. Li, "Scheduling elective surgeries with sequence-dependent setup times to multiple operating rooms using constraint programming," *Oper. Res. Heal. Care*, vol. 3, no. 3, pp. 160–167, 2014.
- [9] S. Wang *et al.*, "A discrete event simulation evaluation of distributed operating room scheduling," *IIE Trans. Healthc. Syst. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 236–245, 2016.
- [10] R. Guido and D. Conforti, "A hybrid genetic approach for solving an integrated multi-objective operating room planning and scheduling problem," *Comput. Oper. Res.*, vol. 87, pp. 270–282, 2017.
- [11] P. Landa, *et al.*, "A hybrid optimization algorithm for surgeries scheduling," *Oper. Res. Heal. Care*, vol. 8, pp. 103–114, 2016.
- [12] H. Fei, *et al.*, "A planning and scheduling problem for an operating theatre using an open scheduling strategy," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 58, no. 2, pp. 221–230, 2010.
- [13] I. Marques and M. E. Captivo, "Bicriteria elective surgery scheduling using an evolutionary algorithm," *Oper. Res. Heal. Care*, vol. 7, no. 2015, pp. 14–26, 2016. [14] A. C. Zenteno *et al.*, "Pooled Open Blocks Shorten Wait Times for Nonelective Surgical Cases," *Annals of Surgery*, vol. 262, no. 1, 2015.
- [15] J. M. Molina-Pariente, *et al.*, "Modelos para la resolución de la programación de quirófanos," in *3rd International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management*, pp. 1356–1365, 2009.
- [16] G. Latorre-núñez, *et al.*, "Scheduling operating rooms with consideration of all resources , post anesthesia beds and emergency surgeries," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 97, pp. 248–257, 2016.
- [17] W. Xiang and C. Li, "Surgery scheduling optimization considering real life constraints and comprehensive operation cost of operating room," *Technology and Health Care.*, vol. 23, pp. 605–617, 2015.
- [18] B. Cardoen, *et al.*, "Operating room planning and scheduling: A literature review," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 201, no. 3, pp. 921–932, Mar. 2010.
- [19] A. M. Jiménez, N. Velásco, and C. Amaya, "Estrategias de programación de salas de cirugía: un caso de aplicación en un hospital de Bogotá," *Los Cuadernos de PYLO*, pp. 17, 2008.
- [20] J. Blake, "Capacity planning in operating rooms," *Handb. Healthc. Deliv. Syst.*, vol. 34, p. 1-12, 2011.
- [21] E. Hans, *et al.*, "Robust surgery loading," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 185, no. 3, pp. 1038–1050, 2008.
- [22] M. P. Davila, "A Methodology for Scheduling Operating Rooms Under Uncertainty," University of South Florida, 2013.
- [23] J. Banks, B. L. Nelson, J. S. Carson, and D. M. Nicol, *Discrete-Event System Simulation*, Pearson. 2010.