

Aproximación metodológica a la planificación y a la programación de las salas de cirugía: una revisión de la literatura*

Methodological approach to the planning and scheduling of operating rooms: a literature review

Aproximação metodológica à planificação e programação das salas de cirurgia: revisão de literatura

Fecha de recepción: 24-01-13 Fecha de aceptación: 25-02-13
SICI: 1657-7027(201301)12:24<249:AMPPSC>2.0.TX;2-M

Paula Andrea Velásquez-Restrepo**
Alma Karina Rodríguez-Quintero***
Juan Sebastián Jaén-Posada****

* Informe de investigación, artículo de revisión. El artículo de investigación se desprende del estudio en el departamento de cirugía de la IPS Universitaria, Sede Clínica León XIII; IPS Universitaria, servicios de salud de la Universidad de Antioquia; 2010-2012”.

** Investigadora, bioingeniera, magíster en Ingeniería-Logística Hospitalaria, Universidad de Antioquia. Calle 8 # 84F - 220, Urbanización Torre de Valbuena II, Torre 3, Apartamento 609, Sector Loma de los Bernal - Belén, Medellín-Colombia. Correo electrónico: paulavelasquezr@gmail.com

*** Ingeniera industrial, estudiante de especialización en Logística Integral, Universidad de Antioquia. Correo electrónico: kary_rq@hotmail.com

**** Docente del Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Antioquia; ingeniero administrador de la Universidad Nacional de Colombia; magíster en Ingeniería-Sistemas, Universidad Nacional del Colombia; doctor en Ingeniería-Sistemas, Universidad Nacional del Colombia. Correo electrónico: jjaen@udea.edu.co

Resumen

El sector hospitalario en diferentes partes del mundo se ha visto obligado a incursionar en la reducción de costos. Las salas de cirugía son uno de los departamentos más costosos de los hospitales debido a los problemas que presenta la planeación y programación de las operaciones. El presente trabajo proporciona una revisión de las diferentes investigaciones enfocadas a solucionar los problemas de la planeación de las salas de cirugía. Se realizó una clasificación de las técnicas de solución más utilizadas y los resultados que se consiguieron. De los ochenta artículos más recientes se encuentra que un 62% de los trabajos abordan el problema de la reducción del tiempo de espera de los pacientes por ser atendidos, y que la optimización multiobjetivo estocástica es la metodología que en un 33% de los casos se plantea como la aproximación que de manera más completa aborda todos los aspectos involucrados en el proceso de planeación, reduciendo los costos hasta en un 15%.

Palabras clave: planificación de salas de cirugía, reducción de tiempos y costos, logística hospitalaria, investigación de operaciones

Palabras clave descriptor: quirófanos, Investigación operacional, evaluación de resultados, atención médica, administración hospitalaria, control de costos

Abstract

The hospital sector in different parts of the world has been forced to move into cost reduction. The operating rooms are one of the most expensive departments of hospitals due to the problems presented by planning and scheduling the operations. This paper provides an overview of the different research focused on solving the problems of planning the operating rooms. We performed a classification of the solution techniques used and the results that were achieved. Of the eighty latest articles, 62% of the works deal with the problem of reducing the waiting time for patients to be treated, and the optimization of the multiobjective stochastic is the methodology which in 33% of the cases arises as the approach that more fully addresses all aspects involved in the planning process, reducing costs by up to 15%.

Keywords: operating room planning, time and cost reduction, hospital logistics, operations research

Keywords plus: operating rooms, operations research, outcome assessment, medical care, hospital administration, cost control

Resumo

O setor hospitalar em diferentes partes do globo tem se visto obrigado a incursionar na redução de custos. As salas de cirurgia são um dos departamentos mais custosos dos hospitais devido aos problemas que apresenta o planejamento e programação das operações. O presente trabalho proporciona revisão das diferentes pesquisas focadas a solucionar os problemas do planejamento das salas de cirurgia. Realizou-se uma classificação das técnicas de solução mais utilizadas e os resultados que se conseguiram. Dos oitenta artigos mais recentes encontra-se que um 62% dos trabalhos abordam o problema da redução do tempo de espera dos pacientes por ser atendidos, e que a otimização multiobjetivo estocástica é a metodologia que, em um 33% dos casos, esboça-se como a aproximação que de maneira mais completa aborda todos os aspectos envolvidos no processo de planejamento, reduzindo os custos até um 15%.

Palavras chave: planificação de salas de cirurgia, redução de tempos e custos, logística hospitalaria, pesquisa de operações

Palavras chave descritores: salas de operações, pesquisa operacional, avaliação de resultados, cuidados de saúde, administração hospitalar, controle de custos



Introducción

Si se toma una muestra global de mil muertes ocurridas en el año 2011, 163 casos de esta muestra provendrían de muertes ocurridas en países con ingreso bajo, 677 de países con ingreso medio, y 169 de países con ingreso alto (1). Del grupo de países con ingreso medio y alto, una cuarta parte de las muertes se debió a enfermedades cerebrovasculares y cardíacas que demandaron intervenciones quirúrgicas complicadas y de gran participación tecnológica (1, 2). Por otro lado, del grupo de países con bajo y mediano ingreso, se demandaron procedimientos quirúrgicos en un rango más amplio, cubriéndose áreas como trauma, pediatría, ortopedia, tórax, neurología, urología, plástica, obstetricia y ginecología. Estas intervenciones no son de gran complejidad pero hacen parte del cuidado médico básico. Los procedimientos quirúrgicos están al nivel de las vacunaciones y la quimioterapia retroviral en el tratamiento de enfermedades y prevención de muertes (3, 4). Según el Banco Mundial y la Organización Mundial de la Salud (OMS), el cubrimiento de esta demanda en todos los niveles de ingreso debe atenderse prioritariamente si se quieren mejorar la salud pública global. Esto se ha considerado un imperativo y una oportunidad (2, 5).

La demanda por servicios quirúrgicos ha venido incrementándose, básicamente por dos factores. La salud como un derecho universal ha ganado influencia en el discurso y las políticas de gobiernos y agencias internacionales. Se desea pasar de las buenas intenciones y la retórica a las políticas y los indicadores de cubrimiento (6). De otro lado, el envejecimiento de la población plantea un incremento de la demanda, triplicando los costos y la necesidad de la atención médica por cada década más de vida (7). El escenario a corto y mediano plazo presenta una creciente demanda insatisfecha por servicios

quirúrgicos, y unos centros asistenciales que deben optimizar al máximo la utilización de los medios que disponen para atender estas necesidades. La programación y la planificación de las salas de cirugía se han planteado como una de las alternativas útiles para abordar el problema de minimizar el tiempo de las intervenciones quirúrgicas y maximizar el uso del quirófano (8). Estas alternativas son aproximaciones cuantitativas que utilizan metodologías de simulación y optimización que permiten modelar los sistemas de estudio y plantear caminos de uso más eficiente de los recursos. El propósito del presente trabajo es presentar la literatura más reciente que aborda de manera cuantitativa el problema de la planificación y programación de las salas de cirugía. Se presentan las metodologías más comúnmente implementadas y las soluciones o políticas de solución a los problemas encontrados. El desarrollo de esta revisión comprende las siguientes secciones: en la segunda sección se describe la problemática de la programación y planificación de las salas de cirugía y se introduce el concepto de investigación de operaciones como la disciplina que ha apoyado todo este desarrollo. En la tercera sección se hace una descripción de las metodologías de búsqueda de los trabajos presentados en la literatura. Se definen los niveles del proceso de planificación y programación de salas de cirugía, las características, los problemas y las metodologías abordadas para su solución. Se hace una clasificación de las técnicas de solución más utilizadas y los resultados que se consiguieron. En la cuarta sección se presenta la discusión final y las conclusiones de esta revisión.

La planificación y la programación de las salas de cirugía y la investigación de operaciones

Las salas de cirugía son entidades que demandan una gran interacción logística. Para que se realice una cirugía se requiere que cuatro elementos confluyan en el lugar y en el tiempo establecidos: el quirófano, el paciente, el personal, el material y el equipo quirúrgico. Cualquiera de estos cuatro elementos que se encuentre ausente, o en deficientes condiciones de servicio, impedirá la realización de la cirugía; el quirófano estará inactivo y todo el sistema incurrirá en costos de tiempo y dinero (8). En este contexto, la planeación y la programación de todas estas actividades logísticas es esencial para permitir la confluencia de estos cuatro elementos en el lugar y en el tiempo establecidos.

Los retos enfrentados por la programación y la planeación de las salas de cirugía se han complicado con el transcurso de los años y las nuevas presiones sobre el sistema de salud (2). La necesidad de hacer una planeación que incorpore la variabilidad de las componentes del sistema ha motivado el uso de herramientas cuantitativas que derivan en disciplinas de la administración (8). La investigación de operaciones (IO) surge como una disciplina dentro de la administración, que provee un enfoque cuantitativo a los problemas relacionados con la toma de decisiones y la administración de recursos escasos. Esta metodología se implementa a partir de la identificación de una situación problemática en un sistema que requiera mejoras. Se determinan las variables relevantes y las relaciones entre estas con el objetivo de construir un modelo matemático que permita la abstracción conceptual de la situación problemática (9). Una vez superada esta etapa, llamada modelamiento, se hace necesaria la identificación de un proceso sistemático que permita utilizar las propiedades del problema matemático para determinar una solución óptima o satisfactoria que procure el mejoramiento de las condiciones del problema. El encontrar

una solución al modelo teórico supondrá encontrar la solución al problema real, evitando la costosa (en tiempo y recursos) experimentación directa con la realidad (9). En este sentido, la IO permite abordar y plantear caminos de solución a los problemas presentes en la logística hospitalaria (10-12).

Desarrollo del trabajo

Descripción de la metodología de búsqueda

La metodología de búsqueda de esta revisión requirió la identificación de trabajos que cumplan la siguiente condición fundamental: que planteen problemas de la planificación y programación de salas de cirugía que sean sujetos de utilizar metodologías de IO en el área de optimización.

Se identificó un conjunto de términos de referencia para abarcar todas las criterios de inclusión: *operations research-surgery rooms, optimization models- surgery rooms, mathematical programming of surgery rooms, mathematical programming - surgery rooms*, y sus semejantes en castellano. Se revisaron 778 trabajos de los que se seleccionaron ochenta artículos, los cuales cumplen con todos los criterios de búsqueda y constituyen la más reciente fuente de información bibliográfica que se encuentra en la literatura. De esta revisión, se extrajo la siguiente información: los niveles, las características, los problemas y las metodologías cuantitativas de la IO empleadas en la planeación y programación de las salas de cirugía, las ventajas y desventajas de las diferentes metodologías según el problema que se aborda y la identificación de casos concretos.

Esta información se clasificó en tablas que permiten encontrar las características de cada nivel de planificación, los problemas y las metodologías abordadas para el estudio de dichos problemas; un resumen de lo



estudiado en la literatura, evaluando cada una de las metodologías de optimización para la construcción del modelo y las técnicas de operación implementadas; y por último, trabajos de aplicación en las diferentes metodologías de optimización. La información en las tablas se agrupó según el tema de interés y las metodologías aplicadas. Se especifica el impacto obtenido, las ventajas y las desventajas de los métodos y la bibliografía encontrada. Por último, al final se presenta un glosario con la terminología de investigación de operaciones abordada en el presente trabajo.

Planificación y programación de salas de cirugía: niveles, característica, problemas y metodologías

La planificación de las salas de cirugía se considera un proceso de tres niveles: estratégico, el cual tiene una mirada global del servicio de cirugía. Su objetivo es definir la oferta quirúrgica del hospital y usualmente se hace sobre una base anual, teniendo en cuenta el presupuesto disponible (13). Adicionalmente, se determina el tiempo de funcionamiento de una o varias salas de cirugía y la distribución de estas, considerando el grupo de cirujanos y los recursos necesarios (13). El segundo nivel es táctico, cuyo objetivo implica el desarrollo de un programa de cirugía, un calendario cíclico que define el número y tipo de salas disponibles, el horario de funcionamiento, y determina los cirujanos o grupos quirúrgicos con prioridad en periodos de tiempo en cada sala. El nivel operativo establece un modelo del orden de las cirugías programadas para un día específico, buscando asignar adecuadamente las cirugías electivas a los quirófanos, minimizando el riesgo de no realización, la reducción de las horas extras de utilización de los quirófanos, la minimización de la cancelación de las cirugías y el tiempo de espera de los pacientes. Cada uno de

estos tres niveles presenta características, problemas y metodologías de solución enfocados a optimizar el uso de las salas de cirugía. La tabla 1 describe las características, los problemas y las metodologías utilizadas para abordar dichos problemas de acuerdo con nivel de planificación.

El manejo de la incertidumbre. Existen unos factores que son determinantes en la planificación de las salas de cirugía, los cuales son: el número y especialidad del quirófano, el estado de los pacientes y el tipo de cirugía. Todas estas variables presentan incertidumbre, y esta afecta directamente los tiempos y la capacidad de los quirófanos, trayendo como consecuencia retardos en las intervenciones quirúrgicas, tiempos de espera prolongados para que los pacientes sean atendidos, cancelaciones de cirugías y trabajo en horas extras del personal quirúrgico.

Por otro lado, desde una perspectiva enfocada al problema, Cardoen y colaboradores (22) exponen que la clase de pacientes y los tiempos de espera son los factores de funcionamiento más tenidos en cuenta en las investigaciones. La clase de paciente es un factor crítico y determinante en el proceso de la planificación de las salas de cirugía, clasificándose en: electivos (hospitalizados y ambulatorios) y no electivos (urgentes y de emergencia). Los primeros son aquellos pacientes para quienes la cirugía se puede planear con anterioridad, mientras que la última clase agrupa a los pacientes para quienes una cirugía es inesperada y por tanto necesita ser realizada con carácter urgente (pacientes lo suficientemente estables para posponer su cirugía por un periodo corto de tiempo) o de emergencia (pacientes a los que se les debe hacer la cirugía de inmediato).

Se encontró que la mayoría de las investigaciones están enfocadas en la planeación de las salas de operaciones,

TABLA 1. NIVELES DE LA PLANIFICACIÓN: CARACTERÍSTICAS, PROBLEMAS Y METODOLOGÍAS

Nivel de planificación	Características de la planificación	Problemas presentes en la planificación	Método de solución	Referencias
Estratégico	Planificación general del funcionamiento del departamento de cirugía	Largos tiempos de espera para que los pacientes sean atendidos. La restricción que pone la capacidad de camas en la programación de las salas de cirugía. Políticas de contratación	Programación multiobjetivo. Simulación de eventos discretos./Dinámica de sistemas	(14, 15)
Táctico	Planificación de las salas de cirugía	Tiempos muertos del quirófano. Cancelación de cirugías.	Programación lineal. Simulación de eventos discretos. Programación lineal entera mixta. Programación cuadrática. Construcciones heurísticas (<i>Simulated annealing, tabu search, genetic algorithm</i>). Programación multiobjetivo. Enfoques estocásticos	(16-48)
Operativo	Programación de cada sala de cirugía.	Cancelación de cirugías. Retrasos en la cirugía. Disponibilidad del personal médico	Programación lineal. Programación lineal entera mixta. Construcciones heurísticas (<i>Simulated annealing, tabu search, genetic algorithm</i>) Programación multiobjetivo. Simulación de eventos discretos Simulación Monte Carlo Simulación basada en agentes Programación dinámica	(17, 18, 22, 24-28, 35, 49-72)

Fuente: elaboración propia

abordando únicamente los pacientes electivos. Cardoen y colaboradores (22) en su revisión de la literatura presentan esta misma observación y la critican, señalando que si bien normalmente se presentan problemas complejos con este tipo de pacientes, comúnmente las deficiencias operacionales son accionadas por la llegada de pacientes no electivos que generan incertidumbre para la planificación de las salas de cirugía. Sin embargo, algunos autores han incorporado los pacientes no electivos. Adan y Vissers (73) construyeron un modelo de programación

que les permitió identificar el ciclo y la interacción de ambos tipos de paciente (electivos y no electivos) en la planificación de recursos. Browsers y Mould (74) exponen que la variabilidad y la incertidumbre en la demanda de las salas de cirugía, especialmente causadas por los pacientes no electivos, generan tiempos muertos en los quirófanos. Los autores en mención utilizan la simulación de Monte Carlo para explorar el equilibrio entre la máxima utilización de los quirófanos, evaluando la política de inclusión de pacientes electivos dentro



de la planificación de urgencia-trauma. Además, plantean modelos de simulación discretos para valorar los efectos de dicha inclusión. Wulliank y colaboradores (31), por su parte, hacen uso de modelos de simulación discreta para evaluar el impacto que tiene el asignar cierta cantidad de salas de cirugías electivas para las no electivas y disminuir el impacto en la cancelación o retraso del programa quirúrgico. Lamiri y colaboradores (49), teniendo en cuenta que la planeación de las actividades quirúrgicas debe considerar la naturaleza incierta de la demanda de la cirugía de emergencia, abordan el estudio como un problema de optimización estocástico, combinado con simulación de Monte Carlo. El trabajo concluyó que la combinación de los métodos permitió encontrar de manera eficiente una solución óptima, mediante el uso de un pequeño número de muestras. Sin embargo, los autores plantean que el modelo tiene ciertas limitaciones del mundo real, tales como la capacidad limitada de horas extras del sistema y la optimización de los costos.

Tiempos de espera. Los investigadores han dado gran importancia a minimizar el tiempo de espera de los pacientes antes de ser atendidos. Las listas de espera largas están entre las mayores quejas del cuidado médico general, así como la disminución del tiempo de espera del cirujano (22). Dexter y colaboradores (35), determinan la cantidad apropiada de tiempo que asignar a los cirujanos y programar las operaciones para pacientes electivos, maximizando el uso de los quirófanos. Arenas y colaboradores (37) desarrollan un modelo de programación con el fin de reducir la duración de la estancia en la lista de espera de un hospital, logrando con ello reducir el tiempo de espera de un año a seis meses. Denton y colaboradores (51) examinan el tiempo “muerto” de los quirófanos y su efecto en los pacientes. Para ello utilizan métodos de programación estocástica y proponen

sistemas heurísticos de solución eficaz y fácil de ejecutar. Van Berkel y Blake (75) hacen uso de la simulación de eventos discretos para examinar como un cambio en el rendimiento o en la optimización de los quirófanos provoca una disminución del tiempo de espera de los pacientes. En particular, esto se presenta en mayor proporción al aumentar la capacidad de camas dentro de la UCI y al cambiar los tiempos de funcionamiento de los quirófanos.

La programación quirúrgica. La forma de abordar los factores dentro de la planificación de las salas de cirugía influye en los problemas que estas presentan. En este sentido, Cardoen y colaboradores (22) plantean que una de las causas de los problemas en la planificación de las salas de cirugía se asocia al desarrollo de enfoques exactos de los horarios de programación de los quirófanos. El proceso quirúrgico posee incertidumbres inherentes lo que conlleva que los acercamientos deterministas del planteamiento no generen los resultados esperados.

Otros autores, como Jiménez y colaboradores (76), aunque reconocen que hay varios estudios que tienen en cuenta la incertidumbre inherente en la programación de cirugías, manifiestan que son pocos los que la incluyen directamente y que la mayoría trabajan bajo supuestos determinísticos: la no existencia de variabilidad en la duración de los procedimientos, los arribos provenientes de urgencias y los retrasos en la llegada de insumos, equipo, alistamiento de las salas y personal médico. De los anteriores, el primero es el supuesto más fuerte, porque reduce la robustez de las programaciones realizadas.

Metodologías y técnicas de solución para la planificación y programación de salas de cirugía. El estudio revela una amplia gama de metodologías aplicadas para el análisis

de planeación y programación de salas de cirugía. Dichas metodologías están dentro del dominio de la IO, convirtiéndose en herramientas de apoyo para el desarrollo de la logística hospitalaria (22). Se puede observar que la mayoría de los problemas en la planificación de una sala de cirugía se formulan y estudian como problemas de optimización, donde los métodos clásicos o exactos (uniobjetivo y multiobjetivo) y los métodos heurísticos (uniobjetivo y multiobjetivo) son los más utilizados para el análisis.

Dentro de los métodos de optimización clásicos o exactos se encontraron estudios sobre la planificación y programación de las cirugías que utilizan: la programación lineal (18, 63, 65, 77-79), la programación lineal entera mixta (17-19, 50, 53, 60, 61, 65, 69, 73, 80), la programación cuadrática (41, 59, 81), la programación dinámica (62, 82), la programación multiobjetivo (16, 37, 40, 83, 84), y otros métodos analíticos como la programación no lineal o la estocástica (42, 43, 74); y métodos metaheurísticos (47, 54) que aparecen ligados a lo que se denomina inteligencia artificial, donde se incluyen los algoritmos evolutivos y las búsquedas heurísticas (46).

Dentro de los métodos clásicos o exactos, el caso más sencillo tendrá un único criterio o factor que tener en cuenta (optimización uniobjetivo). No obstante, esta suposición no siempre es realista. Con frecuencia las organizaciones están interesadas en alcanzar varias metas a la vez, encontrando una solución a diferentes criterios, donde el modelo correspondiente sería una optimización multiobjetivo, la cual proporciona la posibilidad de representar esta situación y encontrar una solución para ella (46, 85). En ambos casos, los problemas de optimización se pueden clasificar en:

lineales, dependiendo de la linealidad o no de las funciones que intervienen en el modelo y de si las variables son enteras o no (85).

Las metaheurísticas generalmente se aplican a problemas que no tienen un algoritmo o heurística específica que dé una solución satisfactoria, o bien cuando no es posible implementar ese método óptimo. La mayoría de las metaheurísticas tienen como objetivo los problemas de optimización combinatoria, pero por supuesto, se pueden aplicar a cualquier problema que se deje reformular en términos heurísticos (86).

Dentro de las técnicas utilizadas para la solución u optimización en la planificación de las salas de cirugías se encuentran la programación matemática, la simulación y los procedimientos analíticos. Referimos a Gass y Harris (87) o Winston y Goldberg (88) para una breve introducción a estas técnicas y a los métodos heurísticos y metaheurísticos. La aplicación de la programación matemática se ha encontrado con limitaciones importantes para resolver problemas actuales cada vez más complejos. Dicha complejidad y su carácter combinatorio han propiciado un mayor uso de técnicas heurísticas con el fin de optimizar la gestión.

Los métodos heurísticos examinados en la literatura fueron: *simulated annealing* (17, 20, 28, 67), *tabu search* (47, 54) y *genetic algorithms* (47, 48). Estos son los más utilizados en la resolución de problemas combinatorios.

Entre las metodologías de simulación, la simulación de eventos discretos es uno de los métodos más utilizados para lograr una planificación de las salas de cirugía (25, 29-38, 50, 60, 65, 67, 71-75, 80, 89); entre los trabajos se destacan: Adan y Vissers (73), Browers y Mould (29, 74), Ballard y colaboradores (89), Wulliank y colaboradores (31), teniendo en



cuenta las características de los pacientes, su interacción y efecto en el sistema; Dexter y colaboradores (35), Arenas y colaboradores (37), Browsers y Mould (74), Jebali y colaboradores (50), VanBerkel y Blake (75), teniendo en cuenta los criterios de funcionamiento; y Yang y colaboradores (72) y Sciomachen y colaboradores (38), tomando en consideración los factores de ejecución.

La simulación de Monte Carlo también es utilizada. Se encuentran varias investigaciones que hacen uso de esta metodología para abordar los problemas (28, 39, 49, 74, 84).

En general, el estudio revela que la mayoría de las propuestas de solución contienen una formulación matemática y su metodología de solución corresponde a heurísticas o se basan exclusivamente en simulación (76). En mucho de los estudios se emplea una combinación de técnicas de solución (formulación matemática o construcciones heurísticas con sistemas de simulación), las cuales se hacen complementarias unas a otras, con el objetivo de acercarse a una solución más exacta del problema y a una validación de este (22).

La bibliografía no enfatiza en las fortalezas o debilidades de los métodos y las técnicas utilizadas para abordar el problema de la planificación y programación de las salas de cirugía, ya que estas dependen de la forma como se aborda el problema y el alcance de la solución de este. Sin embargo, es de resaltar la cantidad de factores que determinan los problemas de la planificación, por lo que una optimización multiobjetivo presentaría soluciones más acordes al funcionamiento global del sistema; esta opinión coincide con el trabajo de Cardoen y colaboradores (22), quienes consideran que son las metodologías más apropiadas para abordar los problemas

presentes en la planificación de las salas de cirugía.

Por otro lado, y haciendo alusión a las técnicas de solución, se evidencia cómo los métodos analíticos son los menos utilizados, por las limitaciones que implica la complejidad del problema. A pesar de esto, es de resaltar que las soluciones que se presentan por los métodos analíticos, son las únicas que se pueden considerar como exactas, en comparación con las técnicas de simulación o heurísticas donde los resultados y la solución en sí misma se deben tratar como una estimación de las características verdaderas del modelo. Este planteamiento se ampliará y se detallará en la sección de discusiones.

En la tabla 2 se presenta un breve resumen de lo estudiado en la literatura, evaluando cada una de las metodologías de optimización para la construcción del modelo y las técnicas de solución empleadas para la solución de dichos modelos.

En la tabla 3 se plantean casos concretos de trabajos desarrollados en las diferentes metodologías de optimización.

Discusión y conclusiones

La revisión reveló que la gestión hospitalaria está cada vez más presionada por los estándares de calidad y eficiencia que el mundo impone. Esto ha llevado a los investigadores a incursionar en el estudio y la evaluación de la aplicación de diferentes metodologías como la optimización y la programación matemática para acompañar y soportar el desarrollo de procesos de calidad en el sistema de salud.

Teniendo en cuenta que los servicios de cirugía son una de las unidades más importantes de

los hospitales, los investigadores muestran que existe una preocupación generalizada por unos problemas concretos: en un 48,55% de los artículos analizados, los investigadores han puesto el énfasis en estudiar metodologías de IO para: evaluar la asignación adecuada de las cirugías electivas a los quirófanos; minimizar el riesgo de no realización; reducir las horas extras de utilización de los quirófanos; minimizar la cancelación de las cirugías y minimizar el tiempo de espera de los pacientes. Otro 48% de los trabajos consultados, indagan por el desarrollo de

un programa de cirugía, un calendario cíclico que define el número y tipo de salas disponibles, el horario de funcionamiento, y el número de cirujanos o grupos quirúrgicos con prioridad en periodos de tiempo en cada sala. Un 2,9% evalúan los criterios para la definición de la oferta quirúrgica del hospital. Usualmente esta se hace sobre una base anual, teniendo en cuenta el presupuesto. Lo anterior permite evidenciar que los investigadores se han centrado más en el estudio de las actividades a nivel operativo y táctico, que en las estrategias.

TABLA 2. RESUMEN DE LAS METODOLOGÍAS DE OPTIMIZACIÓN Y LAS TÉCNICAS DE SOLUCIÓN EMPLEADAS EN LOS DIFERENTES ESTUDIOS EVALUADOS

Optimización uniobjetivo determinístico							
Factor que tener en cuenta	Variable de decisión	Objetivo del trabajo	Tipo de solución	Ventajas del métodos	Desventajas del métodos	Referencias	Porcentaje
Pacientes electivos	Fecha de cirugía	Regular el tiempo de funcionamiento de la sala	Programación dinámica	*El método y el tipo de solución son aplicables en caso tal de que el quirófano no se comparta con pacientes de urgencia. *El tipo de solución es analítico, lo que lo hace ser un poco más exacto.	No se tienen en cuenta los factores probabilísticos, que generan incertidumbres al problema, lo cual le resta confianza y exactitud a la solución	(19, 30, 58-60, 62, 63, 68-70, 77, 80, 82, 89, 90)	29,4%
Capacidad del quirófano	Tiempo de cirugía		Programación lineal				
Disciplina de la cirugía	Sala de cirugía		Programación lineal entera mixta				
	Capacidad de la sala de cirugía		Programación cuadrática				
Optimización uniobjetivo estocásticos							
Factor que tener en cuenta	Variable de decisión	Objetivo del trabajo	Tipo de solución	Ventajas del métodos	Desventajas del métodos	Referencias	Porcentaje
Pacientes no electivos	Tiempo de cirugía	Determinar los horarios de las salas de operaciones	Programación lineal	La principal ventaja del método es que tiene en cuenta la incertidumbre del problema.	Al solo tener en cuenta un solo objetivo, se está limitando el modelo con respecto a la realidad. La solución no es tan acertada.	(17, 25, 28, 64, 66, 67)	11,8%
Capacidad de quirófano	Sala de cirugía		Simulación				
Demanda del quirófano Duración del procedimiento	Capacidad de la sala de cirugía		Heurístico				



Optimización multiobjetivo determinístico							
Factor que tener en cuenta	Variable de decisión	Objetivo del trabajo	Tipo de solución	Ventajas del métodos	Desventajas del métodos	Referencias	Porcentaje
Pacientes electivos (hospitalizados y ambulatorios)	Fecha de cirugía	Determinar los horarios de las salas de operaciones	Programación lineal entera mixta	La principal ventaja del método es que tiene en cuenta la incertidumbre del problema.	Al solo tener en cuenta un único objetivo, se está limitando el modelo con respecto a la realidad. La solución no es tan acertada.	(23, 50, 53, 60, 61, 65, 73)	25,5%
Subutilización de quirófanos	Capacidad de la sala de cirugía.		Simulación de eventos discretos	Los métodos analíticos son los más exactos a la hora de dar solución a un problema.	La aplicación de la programación matemática ha revelado limitaciones para resolver problemas de complejidad y carácter combinatorio, por su difícil solución.	(37, 60, 65, 73)	
Capacidad de UCI	Tipo de sala de cirugía		Heurísticos	Los métodos heurísticos y de simulación son útiles para problemas que no tienen un algoritmo específico que dé una solución satisfactoria, o cuando no es posible implementar un método óptimo.	Los resultados de las técnicas de simulación o heurísticas y la solución del problema con dichas técnicas se debe tratar como una estimación de las características verdaderas del modelo.	(54, 57)	
Tiempo de la cirugía							
Optimización multiobjetivo estocástico							
Factor que tener en cuenta	Variable de decisión	Objetivo del trabajo	Tipo de solución	Ventajas del método	Desventajas del método	Referencias	Porcentaje
Llegada de pacientes	Fecha de cirugía	Tener un uso eficiente de las salas de cirugía, contando con las cirugías no electivas.	Programación lineal entera mixta	La principal ventaja del método es que tiene en cuenta la incertidumbre del problema. Al tener en cuenta varios factores y variables de decisión, el modelo se acerca más a la realidad y su solución es más exacta.	A pesar de que es un método multiobjetivo, las investigaciones revelan que en los estudios no se están teniendo en cuenta todos los factores claves en el problema ni sus variables, y que alguno de estos factores se ajusta como determinístico.	(23, 65)	33,3%
Subutilización de quirófanos	Capacidad de la sala de cirugía		Métodos de solución heurísticos	Los métodos analíticos son los más exactos a la hora de dar solución a un problema.		(28, 67)	
Capacidad de UCI	Tipo de sala de cirugía		Simulación Monte Carlo	Los métodos heurísticos y de simulación son útiles para dar solución satisfactoria a aquellos problemas que no tienen un algoritmo específico o que no poseen una solución matemática factible.		(28, 39, 49)	
Tiempo de la cirugía	Estado del paciente		Simulación de eventos discretos			(29-34, 38, 65, 67, 74)	

Fuente: elaboración propia

TABLA 3. TRABAJOS DE APLICACIÓN DE LAS DIFERENTES METODOLOGÍAS DE OPTIMIZACIÓN

Metodología	Trabajo	Técnica de Solución	Optimización	Objetivo de Estudio	Variables consideradas	Resultados alcanzados	Referencias
Uniojetivo determinístico	“Optimization of operating room allocation using linear programming techniques”	Programación lineal	Optimizar la asignación del tiempo entre un grupo de cirujanos sobre la base de la generación de honorarios profesionales.	Determinar la combinación óptima de asignación de tiempo quirúrgico para maximizar los ingresos profesionales.	*Pacientes electivos y no electivos *Tiempo de la cirugía	Se incrementaron en un 15% las cirugías realizadas en una semana, lo que permitió tener un incremento en el ingreso anual de 1,5 millones de dólares.	PC Kuo y colaboradores (77)
Uniojetivo estocástico	“Optimization of surgery sequencing and scheduling decisions under uncertainty”	Heurísticas	Optimizar la secuencias de las cirugías	Determinar la programación óptima de las secuencias de las cirugías, teniendo en cuenta la incertidumbre del tiempo de duración de estas.	*Tiempo de la cirugía (estocástico)	Analizaron la varianza de la duración de las cirugías. Aplicaron dichos parámetros, logrando con ello reducir los tiempos muertos del quirófano simulación.	Denton y colaboradores (51)
Multiobjetivo determinístico	“Solving a tactical operating room planning problem by a column-generation-based heuristic procedure with four criteria”	Heurísticas algoritmo genético híbrido (AGH)	Diseñar un horario semanal de cirugías, teniendo en cuenta la especialidad del cirujano, con el objetivo de maximizar la utilización de los quirófanos para minimizar el costo extra en el quirófano y su tiempo de inactividad.		*Disponibilidad de camas de recuperación *Capacidad de los quirófanos *Disponibilidad de quirófanos y cirujanos *Fechas de las cirugías	Evalúan varios criterios y la conclusión es que para obtener una solución aproximada se debe utilizar una combinación de criterios.	H. Fei y colaboradores (57)
Multiobjetivo estocástico	“Optimization methods for a stochastic surgery planning problem”	Programación entera mixta Simulación Monte Carlo	Asignar de una manera óptima los casos electivos de cirugía, teniendo en cuenta la llegada de forma aleatoria de los pacientes de emergencia, con el objetivo de reducir gastos para los pacientes electivos y disminuir costos de horas extras.		*Pacientes electivos *Pacientes no electivos (estocástico) *Disciplina de la cirugía (estocástico)	*Disminución en la cancelación de cirugía *Disminución de la estancia de pacientes en el hospital *Disminución de costos	Lamiri y colaboradores (49)

Fuente: elaboración propia

En la planificación y en la programación de las salas de cirugía se han identificado unos factores claves que las determinan. La investigación identificó que con un 24,1% el factor *clase de paciente* es el que más se tiene en cuenta, y con un 12,7% el factor *tiempo de espera de los pacientes por ser atendidos*, siendo esto una causa de alarma para el sistema de salud, los administradores de los servicios y los investigadores en

general, debido a que esto demuestra que la oportunidad en la atención en salud sigue siendo un problema de alcance mundial. Para solucionar este problema, los investigadores han abordado diferentes técnicas de IO, siendo una de las más representativas la programación matemática (62,6%). Dentro de esta, la optimización multiobjetivo estocástico es la más representativa, con un 33,3%, siguiendo la optimización uniojetivo



determinística con un 29,4%, la optimización multiobjetivo determinística con un 25,5% y la optimización uniobjetivo estocástico con un 11,8%. Es por esto que se plantea que los modelos multiobjetivo estocásticos son los más adecuados y pertinentes a la hora de optimizar el proceso de planeación de quirófanos.

Una de las deficiencias que evidencian algunos de los métodos de análisis y las técnicas de solución, se asocia con la falta de incorporación de las incertidumbres inherentes de los servicios quirúrgicos. Cuando un problema se considera estocástico, la solución demuestra ser útil y de mayores beneficios, ya que aborda el problema con un acercamiento más a la realidad.

Por último, y con el objetivo de obtener una validación del modelo implementado y de las soluciones generadas cuando se están analizando casos de desempeño operativo, se establece que dentro de los métodos de simulación propuestos por la literatura, se considera la simulación de eventos discretos como el más apropiado que seguir, habida cuenta que en este tipo de modelo, la variable tiempo se trata de manera explícita y no se restringe a ciclos fijos e inamovibles, sino que se fija en cada momento, de acuerdo con el evento que se analiza. Se pueden emplear diferentes tiempos en función de los eventos que vayan a suceder y el momento en el que van a aparecer. Por otra parte, estos modelos permiten contemplar resultados múltiples, lo que se adecúa mucho más a la realidad; además, permiten incorporar la incertidumbre del problema, siendo este método más adecuado para la solución de modelos estocásticos, los cuales, como se expuso anteriormente, representan de una manera más acertada la realidad de los problemas de programación de salas de cirugía. Además, estos modelos pueden aportar información sobre resultados intermedios en los momentos definidos

en la simulación (cuando aparecen complicaciones), lo que permite ofrecer resultados desde distintas perspectivas sin tener que ejecutar el modelo más de una vez. Es por esto que se propone la simulación de eventos discretos como técnica de validación del modelo propuesto.

El estudio evidencia que aun cuando no puede hablarse de un único modelo de solución que seguir, ya que para cada hospital se consideran supuestos, objetivos y restricciones diferentes, los problemas de programación de las salas de cirugía dependen de unos factores que a grandes rasgos están muy identificados, los cuales se generalizan para las salas de cirugía en diferentes tipos de hospitales. Esto permite identificar y proponer una metodología que seguir para la solución del problema de planificación y programación de quirófanos.

Apéndice 1

Modelo: es la representación de un sistema real, con un determinado nivel de abstracción, que puede ser empleado para propósitos de descripción, control o predicción.

Modelos determinísticos: son modelos cuyas variables no están sometidas al azar y en los cuales se conocen con certidumbre los valores de los parámetros.

Modelos probabilísticos: son modelos cuyas variables están sometidas a funciones de probabilidad.

Modelos lineales: son modelos donde la relación entre las variables depende de la proporción entre ellas.

Modelos no lineales: las relaciones del modelo involucran funciones que no obedecen a relaciones de proporcionalidad.

Modelos estáticos: el modelo describe el

sistema para un solo periodo o etapa.

Modelos dinámicos: el modelo describe varios periodos o etapas y el estado de un periodo afecta periodos subsiguientes (91).

Optimización: también llamada programación matemática, intenta dar respuesta a un tipo general de problemas donde se desea elegir la mejor solución entre un conjunto de soluciones (92).

Programación lineal: es una técnica matemática de optimización que permite la construcción y la solución de modelos lineales y determinísticos utilizados para tratar de encontrar el valor de las variables para maximizar o minimizar un objetivo (93).

Programación lineal entera: es un modelo de programación matemático que contiene restricciones y una función objetivo idénticas a las formuladas por programación lineal; la única diferencia es que una o más variables de decisión tienen que tomar un valor entero en la solución final (93).

Programación lineal entera pura: es un problema de programación lineal entera en el cual se exige que todas las variables de decisión tengan valores enteros.

Programación lineal entera mixta: programa lineal entero en el cual se requiere que solo algunas de las variables sean enteras; las demás cumplen con la suposición de divisibilidad (94).

Programación lineal entera binaria: programación lineal en donde se utilizan variables binarias, es decir, utiliza variables restringidas solo a tomar valores de 1 o 0; se utiliza para representar decisiones dicotómicas (sí o no) (94).

Programación lineal multiobjetivo: es una variante de la programación lineal que se

utiliza cuando existen múltiples funciones objetivo (95).

Programación cuadrática: representa una clase especial de programación no lineal en la cual la función objetivo tiene exponentes al cuadrado y las restricciones son lineales (94).

Programación estocástica: maneja situaciones en las cuales los parámetros de las restricciones son variables aleatorias y las restricciones se llevan a cabo con una probabilidad mínima (96).

Método de Monte Carlo: tipo de simulación que usa las distribuciones de la probabilidad para determinar si ocurrirán o no determinados eventos aleatorios (94).

Simulación: es una técnica para imitar el comportamiento de los sistemas, con el fin de entender y por ende analizar cómo se desempeña; es utilizada para evaluar el impacto de alternativas. Frecuentemente se emplea para responder a la pregunta ¿Qué pasaría si...? Los dos tipos de simulación más utilizados son dinámica de sistemas y simulación de eventos discretos (91).

Simulación de eventos discretos: simulaciones en las cuales los cambios en el estado del sistema ocurren en puntos aleatorios del tiempo como resultado de la ocurrencia de un evento (97).

Dinámica de sistemas: es la técnica que permite la simulación de un sistema, incluyendo la estructura de políticas en interacción, entendiéndose por política la representación de las causas de una acción. Se utiliza para el manejo y la comprensión de sistemas complejos a un nivel estratégico (9).

Heurística: técnica de búsqueda directa que utiliza reglas favorables prácticas para localizar soluciones mejoradas (96). Regla interna que apela a la intuición para manejar algunos



aspectos de un problema (94).

Metaheurísticos: métodos aproximados diseñados para resolver problemas de optimización combinatoria, en los cuales los heurísticos clásicos no son efectivos. Los metaheurísticos proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos, combinando diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica y los mecanismos estadísticos (98).

Referencias bibliográficas

1. World Health Statistics 2012. Geneva: World Health Organization; 2012.
2. Hybrid ORs: What's behind the increasing demand? *OR Manager*. 2011; 27 (5): 1-4.
3. Ozgediz D, Jamison D, Cherian M, McQueen K. The burden of surgical conditions and access to surgical care in low-income and middle-income countries. *Bulletin of the Global Health Organization*. 2008; 86 (8): 646-647.
4. Jamison D. World Bank and disease control priorities project. *Disease Control Priorities Project in Developing Countries*. New York: Oxford University Press; 2006, p. 1401.
5. Mort EA. Managing the demand for vascular surgery: The imperative, the opportunity. *Journal of Vascular Surgery*. 1998; 28 (2): 361-364.
6. McQueen KAK, Ozgediz D, Riviello R, Hsia RY, Jayaraman S, Sullivan SR et ál. *Essential Surgery: Integral to the Right to Health*. 2010; 12 (1).
7. Roizen MF. The surgical burden: How to prevent a crisis in perioperative medicine. *Cleve Clin J Med*. 2006 Mar; 73 Suppl 1: S8-12.
8. Dexter F, Macario A, Traub RD, Hopwood M, Lubarsky DA. An operating room scheduling strategy to maximize the use of operating room block time: Computer simulation of patient scheduling and survey of patients' preferences for surgical waiting time. *Anesth Analg*. 1999 Jul; 89 (1): 7-20.
9. Borshchev A, Filippov A. From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: Reasons, techniques, tools. The 22nd International Conference of the System Dynamics Society, July 25-29, 2004, Oxford, England.
10. Flagle CD. 50th Anniversary Issue of Operations Research: Some origins of operations research in the health services. *Operations Research*. 2002; 50: 52-60.
11. Brailsford S. Overcoming the barriers to implementation of operations research simulation models in healthcare. *Clinical and Investigative Medicine / Medicine Clinique et Experimentale*. 2005; 28 (6): 312.
12. Teow KL. Practical operations research applications for healthcare managers. *Annals of the Academy of Medicine*. 2009; 38 (6): 564-573.
13. Adan I, Bekkers J, Dellaert N, Jeunet J, Vissers J. Improving operational effectiveness of tactical master plans for emergency and elective patients under stochastic demand and capacitated resources. *European Journal of Operational Research*. 2011; 213 (1): 290-308.
14. García FA. La dinámica de sistemas en economía de la salud. Universidad de Murcia; 2004.
15. Brettlecker G, Cáceres C, Fernández A, Fröhlich N, Kinnunen A, Ossowski S et ál. Technology in healthcare. *CASCOS: Intelligent Service Coordination in the Semantic Web*. 2008: 125-139.
16. Blake JT, Carter MW. A goal programming approach to strategic resource allocation in acute care hospitals. *European Journal of Operational Research*. 2002; 140 (3): 541-561.
17. Beliën J, Demeulemeester E. Building cyclic master surgery schedules with leveled resulting bed occupancy. *European Journal of Operational Research*. 2007; 176 (2): 1185-1204.
18. Blake JT, Dexter F, Donald J. Operating room managers' use of integer programming for assigning block time to surgical groups: A case study. *Anesthesia & Analgesia*. 2002; 94 (1):143-148.
19. Santibáñez P, Begem M, Atkins D. Surgical block scheduling in a system of hospitals: An application to resource and wait list management in a British Columbia health authority. *Health Care Management Science*. 2007; 10 (3): 269-282.
20. Beliën J, Demeulemeester E, Cardoen B. A decision support system for cyclic master surgery scheduling with multiple objectives. *Journal of Scheduling*. 2009; 12 (2): 147-161.
21. Vissers J, Adan I, Bekkers J. Patient mix optimization in tactical cardiothoracic surgery planning: A case study in cardiothoracic surgery planning. *Health Care Manag Sci*. 2009 Jun; 12 (2): 129-141.
22. Cardoen B, Demeulemeester E, Beliën J. Operating room planning and scheduling: A literature review. *European Journal of Operational Research*. 2010; 201 (3): 921-932.
23. Pérez Gladish B, Arenas Parra M, Bilbao Terol A, Rodríguez Uría M. Management of surgical waiting lists through a possibilistic linear multiobjective programming problem. *Applied Mathematics and Computation*. 2005; 167 (1): 477-495.
24. Marques I, Captivo ME, Pato MV. Planning elective surgeries. Analysis and comparison in a real case. *Universidade de Lisboa - Centro de Investigação Operacional (CIO) Working paper*, 2009.
25. Marcon E, Kharraja S, Simonnet G. The operating theatre planning by the follow-up of the risk of no realization. *International Journal of Production Economics*. 2003; 85 (1): 83-90.
26. Przasnyski ZH. Operating room scheduling. A literature review. *AORN Journal*. 1986; 44 (1): 67-79.
27. Blake JT, Donald J. Mount Sinai hospital uses integer programming to allocate operating room time. *Interfaces*. 2002: 63-73.
28. Hans E, Wullink G, Van Houdenhoven M, Kazemier G. Robust surgery loading. *European Journal*

- of Operational Research. 2008; 185 (3): 1038-1050.
29. Bowers J, Mould G. Ambulatory care and orthopaedic capacity planning. *Health Care Management Science*. 2005; 8 (1): 41-47.
 30. Cardoen B, Demeulemeester E. Capacity of clinical pathways- A strategic multi-level evaluation tool. *Journal of Medical Systems*. 2008; 32 (6): 443-452.
 31. Wullink G, Van Houdenhoven M, Hans EW, van Oostrum JM, van der Lans M, Kazemier G. Closing emergency operating rooms improves efficiency. *Journal of Medical Systems*. 2007; 31 (6): 543-546.
 32. Dexter F, Macario A, Lubarsky DA. The impact on revenue of increasing patient volume at surgical suites with relatively high operating room utilization. *Anesthesia & Analgesia*. 2001; 92 (5): 1215-1221.
 33. Everett J. A decision support simulation model for the management of an elective surgery waiting system. *Health Care Management Science*. 2002; 5 (2): 89-95.
 34. Niu Q, Peng Q, ElMekkawy T, Tan YY, Bryant H, Bernaerdt L, editors. Performance analysis of the operating room using simulation. *Proceedings of the Canadian Engineering Education Association*. 2007.
 35. Dexter F, Macario A, Traub RD. Enterprise-wide patient scheduling information systems to coordinate surgical clinic and operating room scheduling can impair operating room efficiency. *Anesthesia & Analgesia*. 2000; 91 (3): 617-626.
 36. Kim SC, Horowitz I. Scheduling hospital services: The efficacy of elective-surgery quotas. *Omega*. 2002; 30 (5): 335-346.
 37. Arenas M, Bilbao A, Caballero R, Gómez T, Rodríguez M, Ruiz F. Analysis via goal programming of the minimum achievable stay in surgical waiting lists. *Journal of the Operational Research Society*. 2002; 53 (4): 387-396.
 38. Sciomachen A, Tanfani E, Testi A. Simulation models for optimal schedules of operating theatres. *International Journal of Simulation*. 2005; 6 (12-13): 26-34.
 39. Paoletti X, Marty J. Consequences of running more operating theatres than anaesthetists to staff them: a stochastic simulation study. *British Journal of Anaesthesia*. 2007; 98 (4): 462-469.
 40. Velásquez R, Melo T, Küfer KH. Tactical operating theatre scheduling: Efficient appointment assignment. *Operations Research Proceedings* 2007. 2008, pp. 303-308.
 41. Kharraja S, Albert P, Chaabane S, editors. Block scheduling: Toward a master surgical schedule. *IEEE*; 2006.
 42. Fei H, Chu C, Meskens N, Artiba A. Solving surgical cases assignment problem by a branch-and-price approach. *International Journal of Production Economics*. 2008; 112 (1): 96-108.
 43. Lamiri M, Xie X, Dolgui A, Grimaud F. A stochastic model for operating room planning with elective and emergency demand for surgery. *European Journal of Operational Research*. 2008; 185 (3): 1026-1037.
 44. Ozkarahan I. Allocation of surgeries to operating rooms by goal programming. *Journal of Medical Systems*. 2000; 24 (6): 339-378.
 45. Mulholland MW, Abrahamse P, Bahl V. Linear programming to optimize performance in a department of surgery. *Journal of the American College of Surgeons*. 2005; 200 (6): 861-868.
 46. Linares P, Ramos A, Sánchez P, Sarabia Á, Vitoriano B. *Modelos matemáticos de optimización*. Universidad de Comillas, España; 2001.
 47. Fei H, Meskens N, Chu C, editors. An operating theatre planning and scheduling problem in the case of a block scheduling strategy. *IEEE*; 2006.
 48. Roland B, Di Martinelly C, Riane F, editors. *Operating theatre optimization: A resource-constrained based solving approach*. *IEEE*; 2007.
 49. Lamiri M, Grimaud F, Xie X. Optimization methods for a stochastic surgery planning problem. *International Journal of Production Economics*. 2009; 120 (2): 400-410.
 50. Jebali A, Hadj Alouane AB, Ladet P. Operating rooms scheduling. *International Journal of Production Economics*. 2006; 99 (1-2): 52-62.
 51. Denton B, Viapiano J, Vogl A. Optimization of surgery sequencing and scheduling decisions under uncertainty. *Health Care Management Science*. 2007; 10 (1): 13-24.
 52. Cardoen B, Demeulemeester E, Beliën J. Sequencing surgical cases in a day-care environment: An exact branch-and-price approach. *Computers & Operations Research*. 2009; 36 (9): 2660-2699.
 53. Cardoen B, Demeulemeester E, Beliën J. Optimizing a multiple objective surgical case sequencing problem. *International Journal of Production Economics*. 2009; 119 (2): 354-366.
 54. Hsu VN, de Matta R, Lee CY. Scheduling patients in an ambulatory surgical center. *Naval Research Logistics (NRL)*. 2003; 50 (3): 218-238.
 55. Lamiri M, Xie X, editors. *Operating rooms planning using lagrangian relaxation technique* *IEEE*; 2006.
 56. Guinet A, Chaabane S. Operating theatre planning. *International Journal of Production Economics*. 2003; 85 (1): 69-81.
 57. Fei H, Chu C, Meskens N. Solving a tactical operating room planning problem by a column-generation-based heuristic procedure with four criteria. *Annals of Operations Research*. 2009; 166 (1): 91-108.
 58. Beliën J, Demeulemeester E, Cardoen B. Visualizing the demand for various resources as a function of the master surgery schedule: A case study. *Journal of Medical Systems*. 2006; 30 (5): 343-350.
 59. Dexter F, Macario A. When to release allocated operating room time to increase operating room efficiency. *Anesthesia & Analgesia*. 2004; 98 (3): 758-762.
 60. Zhang B, Murali P, Dessouky M, Belson D. A mixed integer programming approach for allocating operating room capacity. *Journal of the Operational Research Society*. 2008; 60 (5): 663-673.
 61. Pham DN, Klinkert A. Surgical case scheduling as a generalized job shop scheduling problem.



- European Journal of Operational Research. 2008; 185 (3): 1011-1025.
62. Calichman MV. Creating an optimal operating room schedule. *AORN*. 2005; 81 (3): 580-588.
 63. Dexter F, Blake JT, Penning DH, Sloan B, Chung P, Lubarsky DA. Use of linear programming to estimate impact of changes in a hospital's operating room time allocation on perioperative variable costs. *Anesthesiology*. 2002; 96 (3): 718-724.
 64. Dexter F, Ledolter J, Wachtel RE. Tactical decision making for selective expansion of operating room resources incorporating financial criteria and uncertainty in subspecialties' future workloads. *Anesthesia & Analgesia*. 2005; 100 (5): 1425-1432.
 65. Persson M, Persson JA. Health economic modeling to support surgery management at a Swedish hospital. *Omega*. 2009; 37 (4): 853-863.
 66. McIntosh C, Dexter F, Epstein RH. The impact of service-specific staffing, case scheduling, turnovers, and first-case starts on anesthesia group and operating room productivity: A tutorial using data from an Australian hospital. *Anesthesia & Analgesia*. 2006; 103 (6): 1499-1516.
 67. Van der Lans M, Hans E, Hurink JL, Wullink G, van Houdenhoven M, Kazemier G. Anticipating urgent surgery in operating room departments. Disponible en <http://alexandria.tue.nl/repository/books/615316.pdf>
 68. Guinet A, editor. A linear programming approach to define the operating room opening hours 2001.
 69. Persson M, Persson JA, editors. Optimization modelling of hospital operating room planning: Analyzing strategies and problem settings. Peter Lang Publishing; 2007.
 70. Velásquez R, Melo M. A set packing approach for scheduling elective surgical procedures. *Operations Research Proceedings 2005*. 2006, pp. 425-430.
 71. Bhattacharyya T, Vrahas MS, Morrison SM, Kim E, Wiklund RA, Smith RM et ál. The value of the dedicated orthopaedic trauma operating room. *The Journal of Trauma*. 2006; 60 (6): 1336-1340.
 72. Yang Y, Sullivan K, Wang P, Naidu KD, editors. Applications of computer simulation in medical scheduling <http://www.chinamedsim.com/upload-file/200901/20090111100349344.pdf>
 73. Adan I, Vissers J. Patient mix optimisation in hospital admission planning: A case study. *International Journal of Operations & Production Management*. 2002; 22 (4): 445-461.
 74. Bowers J, Mould G. Managing uncertainty in orthopaedic trauma theatres. *European Journal of Operational Research*. 2004; 154 (3): 599-608.
 75. VanBerkel PT, Blake JT. A comprehensive simulation for wait time reduction and capacity planning applied in general surgery. *Health Care Management Science*. 2007; 10 (4): 373-385.
 76. Jiménez A, Velasco N, Amaya C. Estrategias de programación de salas de cirugía: un caso de aplicación en un hospital de Bogotá. Disponible en <http://dspace.uniandes.edu.co/xmlui/bitstream/handle/1992/1123/H%202008%2025.pdf?sequence=1>
 77. Kuo PC, Schroeder RA, Mahaffey S, Bollinger RR. Optimization of operating room allocation using linear programming techniques. *Journal of the American College of Surgeons*. 2003; 197 (6): 889-895.
 78. Basson MD, Butler T. Evaluation of operating room suite efficiency in the Veterans Health Administration system by using data-envelopment analysis. *The American Journal of Surgery*. 2006; 192 (5): 649-656.
 79. O'Neill L, Dexter F. Tactical increases in operating room block time based on financial data and market growth estimates from data envelopment analysis. *Anesthesia & Analgesia*. 2007; 104 (2): 355-368.
 80. Testi A, Tanfani E, Torre G. A three-phase approach for operating theatre schedules. *Health Care Management Science*. 2007; 10 (2): 163-172.
 81. Dexter F, Ledolter J. Managing risk and expected financial return from selective expansion of operating room capacity: Mean-variance analysis of a hospital's portfolio of surgeons. *Anesthesia & Analgesia*. 2003; 97 (1): 190-195.
 82. Beliën J, Demeulemeester E. A branch-and-price approach for integrating nurse and surgery scheduling. *European Journal of Operational Research*. 2008; 189 (3): 652-668.
 83. Tan Y, ElMekkawy T, Peng Q, Oppenheimer L, editors. Mathematical programming for the scheduling of elective patients in the operating room department. *Proceedings of the Canadian Engineering Education Association*. 2007. Disponible en <http://library.queensu.ca/ojs/index.php/PCEEA/article/view/3785>
 84. Ogulata SN, Erol R. A hierarchical multiple criteria mathematical programming approach for scheduling general surgery operations in large hospitals. *Journal of Medical Systems*. 2003; 27 (3): 259-270.
 85. Narro Ramirez AE. Aplicación de algunos modelos matemáticos a la toma de decisiones. *Política y Cultura*. 1996; 6: 183-198.
 86. Blum C, Rolí A. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys (CSUR)*. 2003; 35 (3): 268-308.
 87. Gass SI, Harris CM. *Encyclopedia of operations research and management science*. Springer Netherlands; 2001.
 88. Winston WL. *Operations research: Applications and algorithms*. Boston, Massachusetts, USA. 1987.
 89. Ballard SM, Kuhl ME, editors. The use of simulation to determine maximum capacity in the surgical suite operating room. *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*. Disponible en <http://people.rit.edu/mekeie/BallardKuhlWSC06.pdf>
 90. Hughes W, Soliman S. Short-term case mix management with linear programming. *Hospital & Health Services Administration*. 1985; 30 (1): 52-60.
 91. Shannon RE. *La simulación de los sistemas: el arte y ciencia*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall; 1975.
 92. Derigs U. *Optimization and operations research*. Eolss Publishers Company Limited; 2009.



93. Roscoe D, Mckeown P. Modelos cuantitativos para la administración. University of Georgia, Grupo Editora Iberoamericano; 2001.
94. Eppen G, Schmidt CP, Gould FJ. Investigación de operaciones en la ciencia administrativa. Prentice Hall; 1996.
95. Salort EV, Bas ÁÓ, Bertolín JJG. Métodos cuantitativos. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia, Servicio de Publicaciones; 1997.
96. Taha HA. Investigación de operaciones: Pearson Educación; 2004.
97. Hillier Frederick S, Lieberman Gerald J. Introducción a la investigación de operaciones. Mc Graw Hill; 2010.
98. Vélez MC, Montoya JA. Metaheurísticos: una alternativa para la solución de problemas combinatorios en administración de operaciones. Revista EIA. 2007 (8): 99-115.

