

Desarrollo de un Estudio para el Problema de Programación de Salas de Cirugía

María Alejandra Muñoz Ortiz

Código: 2112087

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al Título de
Ingeniera Industrial

Director:

MBA Javier Eduardo Arias Osorio



Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Bucaramanga

2018

Dedicatoria

Un día lo soñé y hoy cada página de este libro me recuerda que soñar vale la pena,
que los sueños si se cumplen, que si lo puedo soñar lo puedo lograr.

Quiero agradecer primero a Dios porque fue Él quien me dio las fuerzas para
cumplir mi sueño, cuando pensé en rendirme me susurró que si podía lograrlo,
que valía la pena recorrerá la milla extra.

A los motores de mi vida, mis padres, que siempre estuvieron ahí para sostenerme.

Mi mamá que a pensar de su cansancio estuvo conmigo siempre en mis desvelos.

Mi papá siempre con una palabra de aliento.

Papitos, gracias por brindarme siempre lo mejor de ustedes,
porque gracias a ustedes hoy puedo decir ¡lo logré!.

A mi hermano Luis Gabriel por el mejor ejemplo de hermano,
porque me ha enseñado que con esfuerzo es posible llegar muy lejos.

Hermanito, siempre tendrás toda mi admiración.

A mi hermana Sofía por su compañía, sus palabras de apoyo y motivación.

Por último a la personita más importante de mi vida ,
Porque desde que llegaste me motivas a ser una mejor persona.

Gracias Sarita por hacer mi vida feliz.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Planteamiento del Problema	16
2. Objetivos	18
2.1 Objetivo General	18
2.2 Objetivos Específicos.....	18
3. Marco Teórico.....	19
3.1 Operating Rooms in Health Care	19
3.2 Modelos de Optimización	20
3.2.1 Programación Lineal	21
3.2.2 Programación Lineal Entera	22
3.2.3 Programación Lineal Entera Mixta	23
3.3 Métodos de Optimización	23
3.3.1 Métodos Exactos	23
3.3.1.1 <i>Branch and Bound</i>	23
3.3.2 Métodos Heurísticos	23
3.3.3 Métodos Metaheurísticos	24
3.3.3.1 <i>Búsqueda Tabú</i>	24
3.4 Algoritmos Evolutivos	26
3.5 Algoritmos Genéticos	26
3.5.1 Recocido Simulado	27
3.5.2 Simulated Annealing.....	28
3.5.3 Ant System (AS)	29

4. Metodología	30
4.1 Análisis Bibliométrico	30
4.2 Formulación del Modelo Matemático.....	31
4.3 Selección de Técnicas e Instancias	31
4.4 Experimentación	32
4.5 Elaboración del Artículo Publicable	32
5. Revisión de Literatura.....	32
5.1 Base de Datos Consultada.....	32
5.2 Búsqueda y Selección de la Información.....	33
5.3 Clasificación y Categorización de la Información.....	34
5.3 Análisis Preliminar de la Literatura	38
6. Formulación del Modelo.....	45
6.1 Modelo	49
6.1.1 Fase 1	49
6.1.2 Fase 2	53
7. Selección y Programación de Técnicas.....	58
7.1 Fase 1 de Selección y Programación	58
7.2 Fase 2 de Selección y Programación	68
8. Evaluación de las Técnicas	82
9. Artículo Publicable	104
10- Conclusiones y Recomendaciones.....	105
Referencias Bibliográficas	107

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Ecuaciones de Búsqueda</i>	33
Tabla 2. <i>Ecuación de búsqueda seleccionada</i>	34
Tabla 3. <i>Clasificación de los resultados según el tipo de recursos</i>	34
Tabla 4. <i>Clasificación de los resultados según la materia</i>	35
Tabla 5. <i>Clasificación de los resultados según el tipo de publicación</i>	36
Tabla 6. <i>Clasificación de los resultados según el editor</i>	37
Tabla 7. <i>Clasificación de los resultados según el idioma</i>	38
Tabla 8. <i>Clasificación de los resultados según el país</i>	38
Tabla 9. <i>Disponibilidad diaria del cirujano Fp1 y Fp2</i>	59
Tabla 10. <i>Duración pronosticada de la cirugía i d_i</i>	59
Tabla 11. <i>Día de hospitalización del paciente i c_i</i>	60
Tabla 12. <i>Fecha máxima para la cirugía del paciente i e_i</i>	60
Tabla 13. <i>Disponibilidad regular de cada sala de cirugía T_s</i>	60
Tabla 14. <i>Cirujano vs Disponibilidad en horas</i>	62
Tabla 15. <i>Resultados de cada variación realizada al modelo inicial</i>	63
Tabla 16. <i>Modelo Inicial</i>	63
Tabla 17. <i>Variación 1</i>	64
Tabla 18. <i>Variación 2</i>	64
Tabla 19. <i>Variación 3</i>	65
Tabla 20. <i>Duración pronosticada de la cirugía i d_i</i>	66
Tabla 21. <i>Programación:</i>	67
Tabla 22. <i>Valor de Z</i>	68

Tabla 23. <i>La programación obtenida</i>	68
Tabla 24. <i>Hora de cierre de las salas de cirugía Hm:</i>	69
Tabla 25. <i>Duración de las horas extras para las salas de cirugía Ym:</i>	70
Tabla 26. <i>Datos obtenidos de Z</i>	70
Tabla 27. <i>Asignación de pacientes a las sala de cirugía</i>	71
Tabla 28. <i>Asignación de pacientes a la cama de recuperación</i>	71
Tabla 29. <i>Hora de inicio de la operación en la sala de cirugía</i>	72
Tabla 30. <i>Hora de inicio en la cama de recuperación</i>	72
Tabla 31. <i>Asignación de pacientes a las salas de cirugía</i>	73
Tabla 32. <i>Asignación de pacientes a la cama de recuperación</i>	73
Tabla 33. <i>Hora de inicio de la operación en la sala de cirugía</i>	74
Tabla 34. <i>Hora de inicio en la cama de recuperación</i>	74
Tabla 35. <i>Asignación de pacientes a las salas de cirugía</i>	75
Tabla 36. <i>Asignación de pacientes a la cama de recuperación</i>	75
Tabla 37. <i>Hora de inicio de la operación en la sala de cirugía</i>	75
Tabla 38. <i>Hora de inicio en la cama de recuperación</i>	76
Tabla 39. <i>Asignación de pacientes a las sala de cirugía</i>	77
Tabla 40. <i>Asignación de pacientes a la cama de recuperación</i>	77
Tabla 41. <i>Hora de inicio de la operación en la sala de cirugía</i>	78
Tabla 42. <i>Hora de inicio en la cama de recuperación</i>	78
Tabla 43. <i>Asignación de pacientes a las salas de cirugía</i>	79
Tabla 44. <i>Asignación de pacientes a la cama de recuperación</i>	79
Tabla 45. <i>Hora de inicio de la operación en la sala de cirugía</i>	80
Tabla 46. <i>Hora de inicio en la cama de recuperación</i>	80

Tabla 47. <i>Asignación de pacientes a las salas de cirugía</i>	81
Tabla 48. <i>Asignación de pacientes a la cama de recuperación</i>	81
Tabla 49. <i>Hora de inicio de la operación en la sala de cirugía</i>	81
Tabla 50. <i>Hora de inicio en la cama de recuperación</i>	82
Tabla 51. <i>Carga diaria según Médico</i>	84
Tabla 52. <i>Cirujano que opera a cada paciente, Duración de la cirugía, Día de hospitalización del paciente y Día máximo para la cirugía</i>	84
Tabla 53. <i>Programación realizada por la clínica</i>	86
Tabla 54. <i>Datos y parámetros obtenidos del funcionamiento del servicio de cirugía en la IPS Serviclínicos Dromédica S.A</i>	89
Tabla 55. <i>Tiempo de preparación y anestesia, duración de la cirugía, duración de la recuperación (pos-anestesia)</i>	91
Tabla 56. <i>Asignación de pacientes a la sala de cirugía</i>	93
Tabla 57. <i>Asignación de pacientes a la sala de recuperación</i>	94
Tabla 58. <i>Hora de inicio de la operación en la sala de cirugía</i>	95
Tabla 59. <i>Hora de inicio de los pacientes en las camas de recuperación</i>	96
Tabla 60. <i>Asignación de pacientes a la sala de cirugía</i>	97
Tabla 61. <i>Asignación de pacientes a la cama de recuperación</i>	98
Tabla 62. <i>Hora de inicio de la operación en la sala de cirugía</i>	99
Tabla 63. <i>Hora de inicio de los pacientes en las camas de recuperación</i>	99
Tabla 64. <i>Asignación de pacientes a las salas de cirugía</i>	100
Tabla 65. <i>Asignación de pacientes a las camas de recuperación</i>	100
Tabla 66. <i>Hora de inicio de la operación en la sala de cirugía</i>	101
Tabla 67. <i>Hora de inicio de los pacientes en las camas de recuperación</i>	101

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Propuesta metodológica.....	22
<i>Figura 2.</i> Relación entre algunos parámetros	50
<i>Figura 3.</i> Relación entre la función de satisfacción del paciente y el día de la cirugía.....	51
<i>Figura 4.</i> Hora de inicio en la cama de recuperación	72
<i>Figura 5.</i> Hora de inicio en la cama de recuperación	74
<i>Figura 6.</i> Hora de inicio en la cama de recuperación	76
<i>Figura 7.</i> Hora de inicio en la cama de recuperación	78
<i>Figura 8.</i> Hora de inicio en la cama de recuperación	80
<i>Figura 9.</i> Hora de inicio en la cama de recuperación	82

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Código Fase 1	¡Error! Marcador no definido.
Apéndice B. Código Fase 2	¡Error! Marcador no definido.
Apéndice C. Artículo Publicable	111

Resumen

Título: Desarrollo de un estudio para el problema de programación de salas de cirugía.

Autor: María Alejandra Muñoz Ortiz

Palabras Claves: Optimización, algoritmo, programación, software

Descripción:

El aprovechamiento de los recursos disponibles es uno de los máximos objetivos perseguido por los dirigentes en el área de la salud, debido a que se manejan costos muy elevados para el desarrollo de su actividad. Es por esto que se decidió abordar el problema que se presenta en la programación de las salas de cirugía de los hospitales para conocer el comportamiento de los mismos y analizar el funcionamiento, con el fin de minimizar los costos presentes en el servicio y hacer una mejor disposición de los recursos con los cuales se cuenta para poder obtener mayores beneficios económicos.

El problema se aborda en dos fases. La primera fase encargada de asignar el día de la cirugía de cada paciente, teniendo en cuenta factores como la urgencia del procedimiento, maximizando de esta manera la satisfacción de los pacientes. La segunda fase se desarrolla a partir de los resultados obtenidos en la fase anterior y consiste en realizar una secuenciación de las cirugías programadas para el día determinado, con el objetivo de minimizar los costos operativos del servicio.

Finalmente, se prueba el modelo planteado con datos reales de la operación de Serviclínicos Dromédica S.A., con el fin de comparar el funcionamiento del modelo con la programación realizada por la IPS y conocer si se cumple el objetivo del modelo de mejorar el problema planteado, aumentando el nivel de satisfacción de los pacientes, el número de pacientes atendidos y disminuir los costos de la operación del servicio de urgencias.

· Proyecto de Grado

· Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: MBA Javier Eduardo Arias Osorio.

Abstract

Title: Development of a study for the problem of programming of surgery rooms.

Author: María Alejandra Muñoz Ortiz

Keywords: Optimization, algorithm, programming, software

Description:

The use of available resources is one of the maximum objectives pursued by leaders in the area of health, because they handle very high costs for the development of their activity. That is why it was decided to address the problem that is presented in the programming of the operating rooms of hospitals to know the behavior of the same and analyze the operation, in order to minimize the costs present in the service and make a better disposition of the resources with which it is counted in order to obtain greater economic benefits.

The problem is addressed in two phases. The first phase is in charge of assigning the day of surgery for each patient, taking into account factors such as the urgency of the procedure, thus maximizing patient satisfaction. The second phase is developed from the results obtained in the previous phase and consists of performing a sequencing of the surgeries scheduled for the given day, in order to minimize the operating costs of the service.

Finally, the proposed model is tested with real data from the Serviclínicos Dromédica SA operation, in order to compare the operation of the model with the programming carried out by the IPS and to know if the objective of the model is met to improve the problem posed, increasing the level of satisfaction of the patients, the number of patients attended and decrease the costs of the operation of the emergency service.

· Graduation Project

· Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Industrial and Business Studies. Director: MBA Javier Eduardo Arias Osorio.

Introducción

En la actualidad, la asignación de turnos de salas de cirugía se ha convertido en un tema de gran interés para los investigadores como para administradores de los hospitales, debido a que estas instalaciones generan un alto porcentaje de beneficios, pero a su vez, también representan una gran inversión y altos costos de funcionamiento. Es por esto que un sin número de autores se han detenido a analizar y modelar dicho problema, con el fin de obtener la mejor solución posible que permita maximizar beneficios o minimizar tiempos ociosos.

Este trabajo es realizado con la finalidad de profundizar más en el tema, haciendo una revisión de la literatura existente en la cual se exponga como cada uno de los autores que han trabajado esta problemática han abordado el tema, conocer los modelos y métodos de solución planteados y conocer las alternativas de solución generados. Adicionalmente se planteará un modelo del mismo y técnicas de solución que permita contrastar algunos resultados obtenidos previamente en la literatura.

Tabla de cumplimiento de objetivos

OBJETIVO	CUMPLIMIENTO
Realizar una revisión de la literatura sobre el problema de programación de salas de cirugía.	5. Revisión de literatura
Formular un modelo de optimización matemática para la programación de salas de cirugía.	6. Formulación del modelo
Seleccionar y programar las técnicas de optimización a utilizar para resolver el modelo definido, a través de software especializado.	7. Selección y programación de técnicas
Evaluar el desempeño del algoritmo desarrollado con datos obtenidos de la operación de Serviclínicos Dromédica S.A.	8. Evaluación de las técnicas
Elaborar un artículo publicable.	9. Artículo publicable

1. Planteamiento del Problema

Los hospitales en la actualidad son muy diferentes entre sí, estos, han duplicado y hasta triplicado su actividad. Todo ello ha conducido a una sobreocupación de los espacios de los cuales disponen, llegando a un estado de saturación del sistema. Por otro lado se tiene la poca inversión en infraestructura, tecnología y personal, lo que ha ocasionado que se atienda mayor cantidad de pacientes con los mismos recursos.

En los últimos años la demanda del servicio de salud ha incrementado notablemente, debido a factores como la política de salud como un derecho fundamental, las políticas de los gobiernos y agencias internacionales y el envejecimiento de la población.

En el panorama a corto y mediano plazo se presenta un incremento en la insatisfacción de los usuarios de servicios quirúrgicos, y es ahí donde los centros asistenciales prestadores del servicio deben mejorar y aprovechar al máximo los recursos de los cuales se dispone para brindar una atención oportuna y lograr satisfacer las necesidades.

Uno de los problemas se presenta debido a que de un 20% de asegurados en 1990, pasó al 92% en 2012 (Ruíz Gómez, 2012), por lo cual las instituciones de salud en busca de ser más productivas y eficientes, han desarrollado una serie de estudios los cuales tienen como finalidad identificar oportunidades de mejora.

El alto costo de las prácticas médicas ha hecho que los hospitales se involucren en el mundo de la gestión económica con el fin de mejorar los niveles de servicio. La gran cantidad de recursos que se manejan en el servicio quirúrgico, requiere que el sistema adopte un modelo de servicio eficiente. La planificación y programación de las salas de cirugía se plantea como una

alternativa para maximizar el uso de los quirófanos, minimizando el tiempo ocioso en los mismos, con lo cual se lograría altos niveles de eficiencia en el servicio prestado.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Desarrollar un marco de trabajo para el problema de programación de salas de cirugía.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar una revisión de la literatura sobre el problema de programación de salas de cirugía.
- Formular un modelo de optimización matemática para la programación de salas de cirugía.
- Seleccionar y programar las técnicas de optimización a utilizar para resolver el modelo definido, a través de software especializado.
- Evaluar el desempeño del algoritmo desarrollado con datos obtenidos de la operación de Serviclínicos Dromédica S.A.
- Elaborar un artículo publicable.

3. Marco Teórico

3.1 Operating Rooms in Health Care

Es una estructura independiente en la cual se practican intervenciones quirúrgicas y actuaciones de anestesia-reanimación necesarias para el buen desarrollo de una intervención y de sus consecuencias que tienen lugar en general en el exterior del quirófano. Es una unidad estratégica de servicios quirúrgicos, equipada con quirófanos dotados para la prestación de servicios de intervención quirúrgica.

Un gran hospital puede tener más de 50 procedimientos quirúrgicos diferentes por día, los cuales deben ser programados con un tiempo de antelación. Cada procedimiento requiere de un equipo especializado para su desarrollo. Incluso las cirugías más sencillas, pueden presentar variaciones en el tiempo de duración.

Se estima que el 33% del presupuesto de un hospital se invierte en las salas de cirugía (Di Martinelly, Baptiste, & Maknoon, 2014), las cuales son las instalaciones que representan mayores costos para los hospitales y a su vez generan la mayor cantidad de ingresos, los cuales tienen un gran impacto. Los elementos principales son los costos del personal y los costos de materiales.

La gestión de dichas instalaciones se hace cada vez más difícil debido a los conflictos de prioridades de los grupos de interés (Glouberman & Mintzberg, 1996), y escasez de los recursos necesarios para realizar las intervenciones. Para una gestión adecuada se requiere de la coordinación entre el personal y los recursos físicos, debido a que la falta de coordinación puede conducir a una planificación inviable o generar una alta variabilidad en las tasas de utilización de las salas de cirugía.

El horario de la cirugía principal está concebido como un calendario cíclico que define el número y tipo de quirófanos disponibles, y los cirujanos o los grupos quirúrgicos a los que el tiempo de quirófano se les asigna (Blake, Dexter, & Donald, 2002).

3.2 Modelos de Optimización

Un modelo de Optimización Matemática consiste en una función objetivo y un conjunto de restricciones en la forma de un sistema de ecuaciones o inecuaciones.

Los problemas de toma de decisiones se pueden clasificar en dos categorías: modelos de decisión determinísticos y modelos de decisión probabilísticos o estocásticos. El modelo es determinista si las mismas entradas producen siempre el mismo estado y las mismas salidas, en otras palabras, el azar no juega ningún papel en el modelo. Esto depende de la influencia que puedan tener los factores no controlables, en la determinación de los resultados de una decisión y también en la cantidad de información que el tomador de decisión tiene para controlar dichos factores. El modelo es probabilístico o estocástico si, por el contrario, el azar interviene en el modelo, de modo que una misma entrada puede producir diversos estados y salidas, de manera impredecible.

Aquellos modelos que manejan y controlan sistemas de hombres y equipos se enfrentan al problema constante de mejorar el rendimiento del sistema. El problema puede ser reducir el costo de operación y a la vez mantener un nivel aceptable de servicio, utilidades de las operaciones actuales, proporcionar un mayor nivel de servicio sin aumentar los costos, mantener un funcionamiento rentable cumpliendo a la vez con las reglamentaciones gubernamentales establecidas, o mejorar un aspecto de la calidad del producto sin reducir la calidad de otros aspectos.

El modelo matemático que describe el comportamiento de la medida de efectividad se denomina función objetivo. Si la función objetivo es describir el comportamiento de la medida de efectividad, debe capturar la relación entre esa medida y aquellas variables que hacen que dicha medida fluctúe. Las variables del sistema pueden categorizarse en variables de decisión y parámetros. Una variable de decisión es una variable que puede ser directamente controlada por el decisor. También existen algunos parámetros cuyos valores pueden ser inciertos para el decisor. Esto requiere un análisis de sensibilidad después de descubrir la mejor estrategia.

3.2.1 Programación Lineal. La programación lineal es un algoritmo por medio del cual se resuelven problemas o situaciones de la vida real, con el fin de identificar ciertas dificultades y aumentar la productividad y aprovechamiento respecto a los recursos limitados o costosos, aumentando así los beneficios. El principal objetivo de la PL es maximizar o minimizar funciones lineales con varias variables y restricciones lineales, optimizando así la función objetivo.

El primer paso para la resolver un problema de programación lineal, consiste en identificar los elementos básicos de los modelos matemáticos, que son:

- Función objetivo
- Variables
- Restricciones

Y seguidamente se propone la siguiente metodología:

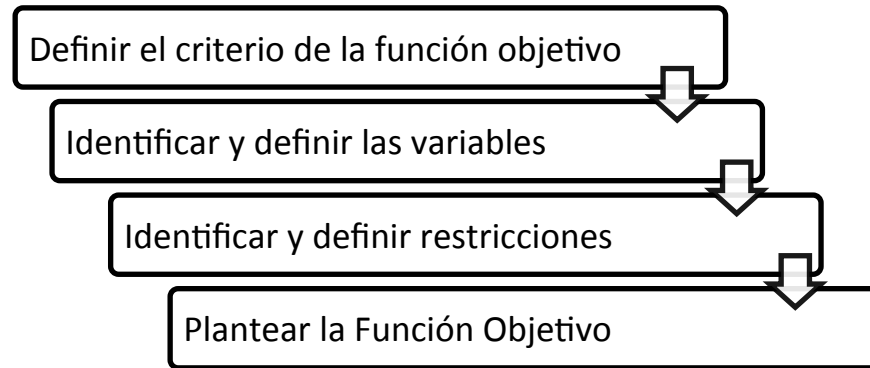


Figura 1. Propuesta metodológica. Adaptado de Bryan Salazar (2016). Programación Lineal.

Recuperado de <http://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingenieroindustrial/investigación-de-operaciones/programación-lineal/>

El término lineal quiere decir que todas las funciones del modelo deben ser funciones lineales. La programación lineal involucra la planeación de actividades para la obtención del resultado que mejor alcance la meta especificada.

3.2.2 Programación Lineal Entera. Son problemas de programación lineal en los cuales algunas de las variables se restringen a tomar valores enteros. Los problemas de PLE permiten modelar muchos más situaciones que la programación lineal, pero su solución es mucho más costosa debido a que presentan un uso computacional mucho más elevado.

La causa de este incremento se debe a que se pierde la propiedad existente en la programación lineal en la que al menos una solución óptima se encuentra en un punto extremo. En estos problemas los conjuntos ya no tienen que ser conexos (pueden estar definidos a trozos), ni tampoco convexos, con lo cual la idea de punto extremo desaparece (Lahoz & Lahoz, 2009).

3.2.3 Programación Lineal Entera Mixta. Mediante la programación lineal entera mixta se puede modelar situaciones donde se requiere optimizar una función lineal sujeta a unas restricciones lineales, donde solo algunas de las variables pueden tomar valores enteros, mientras que otras¹ pueden asumir cualquier número no negativo, es decir, cualquier valor continuo.

3.3 Métodos de Optimización

3.3.1 Métodos Exactos:

3.3.1.1 Branch and Bound. El termino branching hace referencia a la parte enumerativa y bounding al proceso de la poda de soluciones posibles. En este algoritmo, cuando resulta difícil encontrar el óptimo en un conjunto que determinaremos S, divide el conjunto y realiza la búsqueda en partes de S y escoge la mejor solución resultante.

Este tipo de algoritmo se puede representar mediante un árbol, en el cual la raíz corresponde al problema principal y las ramas son el resultado de la división en partes del espacio de búsqueda. A cada nodo del problema le corresponde un subproblema, el cual consiste en buscar la solución óptima en una parte del espacio de soluciones. El concepto de dominancia y factibilidad son los que permiten descartar ramas.

Una manera de llevar a cabo la poda (bounding), es calcular en cada nodo del árbol cotas inferiores al óptimo del problema que está restringido a esa parte del espacio de búsqueda. Si el valor de la cota que se obtiene es peor que el mejor resultado obtenido hasta ese momento, se descarta la exploración de esa parte (Zabala, 2006).

3.3.2 Métodos Heurísticos. Los métodos heurísticos son técnicas que aumentan la eficiencia de un proceso de búsqueda. Comprende el desarrollo de habilidades, procedimientos y

procesos que ofrecen una posibilidad razonable para solucionar un problema. Es una correspondencia entre las descripciones de estados del problema hacia alguna medida de deseabilidad. Quiere decir que mensura cada estado del problema (solución) y dice qué tan cerca se encuentra de la solución óptima.

El propósito de las funciones heurísticas es guiar la búsqueda en la dirección más favorable y determinar qué camino tomar en los casos donde se cuenta con más de uno.

En los problemas de minimización, el valor dado por la heurística es menor o igual al que se obtiene mediante la multiplicación de una constante por el valor óptimo verdadero. Dicha constante se conoce como constante de calidad. La función de esta constante es proporcionar un límite superior en el error que se puede obtener entre el valor encontrado por la heurística y el valor óptimo verdadero. Si para una función heurística se puede conocer un valor de la constante que permanezca igual para todos los problemas del mismo tipo, se puede decir que dicha heurística tiene garantía de calidad (Ramos, 2007).

3.3.3 Métodos Metaheurísticos:

3.3.3.1 Búsqueda Tabú. Se trata de un algoritmo metaheurístico utilizado para resolver problemas de optimización combinatoria, cuyos fundamentos se encuentran en la inteligencia artificial, y es utilizada para calcular, por ejemplo, la asignación de salones en instituciones educativas de enseñanza básica, media y superior. Este algoritmo usa técnicas avanzadas de exploración sensible y nemotecnia, por lo cual su estructura o configuración inicial puede ser conseguida de manera aleatoria. La obtención adecuada de esta configuración puede llevar al resultado óptimo, por el contrario, una mala decisión puede ocasionar la dispersión en la búsqueda desde la máquina procesadora. Un aspecto básico de la Búsqueda Tabú es el de la

generación de vecindario, que permite la selección de la mejor función objetivo, tanto que su paso a la configuración vecina no tenga limitaciones y tenga el aspecto de un algoritmo goloso.

Si el mejor vecino de la lista de candidatos está clasificado como tabú por el proceso de optimización, el criterio de aspiración permite que sea seleccionado a pesar de la prohibición, si la configuración analizada mejora la configuración incómbete. Si en el vecindario originado no existe ninguna configuración que mejore la función objetivo, entonces se selecciona la mejor de las peores, sólo si no ha sido catalogada como tabú durante el proceso de optimización, evitando así quedar atrapado en óptimos locales (Franco Baquero, Toro Ocampo, & Gallego Rendón, 2008).

Esta metaheurística tiene como principio básico realizar una búsqueda local aceptando soluciones que aumentan el costo. En la iteración t el algoritmo se mueve de la solución S_t a la S_{t+1} que es la mejor dentro del subconjunto de soluciones vecinas $N(S_t)$. Se llama movida a la operación que se aplica a S_t para obtener S_{t+1} , la cual no necesariamente tiene un menor costo que S_t , por lo tanto debe utilizarse un mecanismo para que en la iteración siguiente no se vuelva a S_t . Una opción es almacenar todas las soluciones por las cuales se va moviendo, pero con un costo excesivo. Lo que generalmente se utiliza es una memoria de corto plazo que registra algunos atributos de las soluciones ya visitadas y se evita durante cierta cantidad de iteraciones, considerar soluciones que posean dichos atributos. Las soluciones prohibidas son las que se conocen como soluciones tabú y las movidas que llevan hacia estas se llaman movidas tabú. Para esto suele utilizarse un criterio de aspiración, para aceptar las soluciones aun cuando estas sean tabú. Las soluciones admisibles son aquellas que no son soluciones tabú y las que pasan el criterio de aspiración. La búsqueda es realizada sobre las soluciones admisibles de la vecindad (Olivera, 2004).

3.4 Algoritmos Evolutivos

Basados en la Teoría de la Evolución de Charles Darwin, que comprende, por ejemplo, al Algoritmo Genético, y que contempla también la producción y selección de nuevas poblaciones en referencia a sus procesos de recombinación. La primera aplicación de esta técnica, fue para la adecuada asignación de unos horarios de clases en una escuela italiana; también los algoritmos que se inscriben en el conjunto general de los evolutivos pueden combinarse de tal manera que se los pueda usar, por ejemplo, para ejecutar cálculos para obtener los horarios en referencia a profesores, clases e infraestructuras físicas.

Los algoritmos evolutivos pueden trabajar hasta con 20 soluciones, por lo tanto no son reducibles a un modelo general explicativo de todas las realidades, aunque sí se pueden adaptar algunas particularidades que, guardando las proporciones y ajustándose a cambios, pueden intervenir en situaciones concretas. De todas maneras, los algoritmos evolutivos, al permitir series de combinaciones (hibridación) entre sus diversas expresiones, generan resultados óptimos, por ejemplo, en las pruebas porcentuales cuando se le asigna el número máximo de 20 en mutación y de 80 en recombinación, propiciando con esto que en la tercera instancia se vaya expresando la optimización. De esta manera, los horarios quedan correctamente asignados y se evidencia un menor impacto en los cruces de esos horarios (Mejía Caballero & Paternina, 2010).

3.5 Algoritmos Genéticos

Este método trabaja con parámetros codificados, es decir, susceptible de limitarse a un código en secuencias de longitud de carácter limitado sobre un alfabeto infinito. Los algoritmos genéticos sirven para conseguir sistemas con rasgos esenciales semejantes. Esto ha suscitado el interés de por esta técnica, pues abre el espectro de posibilidades de solución y está orientada en

la misma línea de los procesos de selección natural que, en líneas generales, describen la manera en que los organismos que están mejor preparados para adaptarse a un entorno lo hacen, dejando rezagados a aquellos que no lo están en relación con los cambios que se puedan presentar, drástica o paulatinamente, en un entorno (Esquivel, 2014, pág. 95).

Debido a que los criterios de búsqueda en un entorno natural pueden ser mayores que en otros de mayores reservas, los Algoritmos Genéticos permiten explorar en más posibilidades de solución que aquellos que pueden presentar los mecanismos tradicionales. Ya que en términos de la selección de varios conjuntos de datos hay que decantar las mejores soluciones que se muestran, los algoritmos genéticos permiten varias combinaciones entre las posibilidades de solución, propiciando de esta manera una respuesta mucho más exacta. Por el método de descarte y de elección de las combinaciones más adecuadas, se genera una especie de reproducción de esas selecciones, originando una cada cierto tiempo una modificación al azar (Pacheco Agüero, 2000, pág. 83).

3.5.1 Recocido Simulado. La técnica del Recocido Simulado es una de las más usadas por su facilidad de adaptación a diversas situaciones. Permite usarse como variante de una búsqueda local para el manejo de movimientos ascendentes, con lo cual se espera impedir quedar enganchado tempranamente en un óptimo local. No es propiamente un algoritmo, sino una habilidad heurística dependiente de un número dinámico de decisiones para que su diseño y utilización se consideren factibles, por eso su uso, aunque generalizado, debe hacerse con sumo detalle para que funcione bien. Y esas decisiones se dividen fundamentalmente en dos variantes: las genéricas y las específicas.

El Recocido Simulado engaña en la presentación de soluciones parciales, de modo que el usuario las reconozca a través de las posibles inconsistencias que pueda presentar y, de esa manera, proceder a controlarlas en sus movimientos de escape aplicándoles una función de probabilidad; controlando el decrecimiento de una constante señalada, la solución tiende a optimizarse, no obstante, dicha constante requiere de tiempos de cálculo prohibitivos, dependiendo de las mejores decisiones específicas y genéricas que se puedan tomar el encuentro de las soluciones finales. En otras palabras, para problemas matemáticos el congelamiento equivale reducir la proporción del entorno a cero para controlar los cambios presentados, tomando como base de esa reducción la función de coste incidiendo con eso en el número de restricciones no satisfechas representadas en ella (Dowsland & Díaz, 2003).

3.5.2 Simulated Annealing. El algoritmo SIMULATED ANNEALING combina el Hill-Climbing (algoritmo incompleto porque puede estancarse en óptimos locales y no alcanzar el óptimo global pero eficiente, dado el tamaño del espacio de soluciones) con el seguimiento de un camino aleatorio (un algoritmo que se moviese hacia un sucesor elegido de forma uniformemente aleatoria de entre un conjunto de sucesores sería completo pero muy ineficiente) de modo que se pueda conseguir tanto eficiencia como completitud.

El modelo de funcionamiento del algoritmo procede del proceso físico de templado de metales. Para conseguir que la estructura molecular del metal tenga las propiedades deseadas de resistencia o flexibilidad, es necesario controlar la velocidad del proceso de templado (enfriamiento). Si se hace adecuadamente el estado final, es un estado de mínima energía.

El algoritmo consta de 2 elementos clave:

1. Bucle interno: Un método que permite obtener nuevas configuraciones (estados) a partir de la actual (esquema de exploración del espacio de configuraciones)
2. Bucle externo: Un esquema de descenso de temperatura, enfriamiento, que garantiza la convergencia a óptimos globales (mínima energía) (Aarts & Korst, 2012-2013).

3.5.3 Ant System (AS). Está basado en la dinámica del forrajeo de las hormigas, es decir, del cálculo y determinación de los caminos más cortos entre el nido de la colonia y los lugares donde se encuentran los alimentos, es también un modelo usado para calcular los desempeños de un algoritmo base para la programación de horarios. El AS es un algoritmo correspondiente al llamado Ant Colony Optimization (ACO), que es una metaheurística de optimización y se puede describir con más propiedad recurriendo al problema del agente viajero, que se trata de encontrar, en el menor tiempo posible la distancia más corta entre ciudades que debe recorrer un viajante, pasando sólo una vez por cada ciudad o lugar comprendido entre los dos puntos.

El AS tiene también algunas variantes, como el Elitist Ant System (EAS), una refinación del AS original que, en términos de la entomología, consiste en reforzar el mejor camino hallado depositando mayores niveles de feromona, optimizando su uso: cada hormiga deposita una porción de feromona que, a su vez, es manipulada en decrecimiento y en proporción a un nivel correspondiente para ella. En líneas generales, el AS es adaptable a otro tipo de problemas con diferentes componentes, pero con similares objetivos: tratar de encontrar las mejores distribuciones en el menor tiempo con que se cuenta. Los resultados se calculan con base en 20 ejecuciones del algoritmo por problema planteado, lo cual, comparado con otros algoritmos

disponibles, plantea algunas limitaciones que son, en líneas generales, normales por la presentación y emergencia de hechos fortuitos en la realidad (Téllez, 2007, pág. 89).

4. Metodología

Para el desarrollo del trabajo se definió una metodología comprendida por cinco fases:

1. Revisión de la literatura
 - Definición de la temática a tratar
 - Análisis bibliométrico
 - Búsqueda y selección de la información
 - Clasificación y categorización de la información
2. Formulación del modelo matemático
3. Selección de técnicas
4. Experimentación
5. Elaboración del artículo publicable

4.1 Análisis Bibliométrico

Para poder obtener una visión más amplia, analizar y comprender de la problemática abordada, se realizó un análisis bibliométrico dentro de una ventana de tiempo comprendida entre los años 2010 al 2016, donde se pudo conocer las posibles alternativas de solución que han sido planteadas por los autores que han trabajado en el problema. En el análisis se realizó una revisión general y se establecieron unas posibles ecuaciones de investigación (Ver anexo 3).

4.2 Formulación del Modelo Matemático

En esta fase se propone la formulación de un modelo matemático para el problema de la asignación de salas de cirugía. La estrategia de solución consiste en un modelo basado en restricciones para el problema, que se aproximen a las características que se abordan en la temática.

A continuación se detallan algunos elementos que deben ser considerados para el diseño del modelo:

- **Salas de cirugía:** corresponde a la cantidad de salas que son demandadas para la prestación del servicio de cirugías.
- **Pacientes:** son las personas que deben ser programadas.
- **Cirujanos:** son el recurso humano responsable del desarrollo de las cirugías.
- **Instrumentadores quirúrgicos:** responsables de la instrumentación, asepsia, desinfección y esterilización de las salas y es necesario para el desarrollo de la actividad.
- **Auxiliares de enfermería:** personal de apoyo necesario para desarrollar la actividad.

4.3 Selección de Técnicas e Instancias

Para esta fase, se estudian las técnicas que se obtuvieron en la revisión de la literatura y que han sido más utilizadas por los autores para la solución del problema. Se seleccionan aquellas que se adecuen mejor a las características y elementos que han sido tenidos en cuenta en la fase de formulación.

4.4 Experimentación

Una vez seleccionadas las técnicas con las que se va a desarrollar la investigación, se experimenta con cada una de las técnicas establecidas, la formulación del problema planteado en la fase dos. Después de obtener los resultados de la experimentación, se selecciona aquella que genere el mejor resultado como alternativa de solución para este trabajo.

4.5 Elaboración del Artículo Publicable

Fase final en la cual se un artículo, el cual enmarcará los principales resultados del trabajo de investigación, de una manera clara y objetiva, que cumpla con los objetivos planteados en el proyecto.

5. Revisión de Literatura

5.1 Base de Datos Consultada

La búsqueda de la información se apoyó principalmente en la base de datos de la Universidad Industrial de Santander EBSCO, que es una plataforma que integra 13 bases de datos entre las cuales se encuentra MEDICLATINA, es una colección única de revistas especializadas en la investigación médica, obra de reconocidas editoriales médicas de Latinoamérica y España. Esta base de datos en español contiene texto completo de alrededor de 130 publicaciones especializadas en medicina arbitradas en español nativo. Además de ésta se encuentra también MEDLINE la cual es la fuente más completa del mundo de textos completos de publicaciones médicas, y proporciona el texto completo de más de 1.450 publicaciones

indexadas en MEDLINE. Entre ellas, más de 1.430 cuentan con indexación de portada a portada en MEDLINE.

5.2 Búsqueda y Selección de la Información

Para llevar a cabo la búsqueda y selección de la información, se formularon las siguientes ecuaciones de búsqueda encontrando los siguientes resultados para cada una de ellas:

Tabla 1.

Ecuaciones de Búsqueda

ECUACIÓN	TIEMPOS	RESULTADO
Optimiz* and operating rooms	2010-2016	1.075
programm* and operating rooms	2010-2016	628
techni* and operating rooms	2010-2016	50.237
model* and operating room	2010-2016	3.550
(optimiz* or programm*) AND operating rooms	2010-2016	1.629
(optimiz* or techni*) AND operating rooms	2010-2016	6.057
(optimiz* or model*) AND operating rooms	2010-2016	4.330
(programm* or techni*) AND operating rooms	2010-2016	5.732
(programm* or model*) AND operating rooms	2010-2016	4.017
(techni* or model*) AND operating rooms	2010-2016	8.017
(optimiz* or programm* or techni*) AND operating rooms	2010-2016	6.478
(optimiz* or techni* or model*) AND operating rooms	2010-2016	8.594
(programm* or techni* or model*) AND operating rooms	2010-2016	8.350
(optimiz* or programm* or model*) AND operating rooms	2010-2016	4.741
(optimiz* or programm* or techni* or model*) AND operating rooms	2010-2016	8.908
optimiz* and (technic* or program* or model*) and operating rooms	2010-2016	525
technic* and (optimiz * or program* or model*) and operating rooms	2010-2016	612
programm* and (technic* or optimiz* or model*) and operating rooms	2010-2016	260
model* and (technic* or program* or optimiz*) and operating rooms	2010-2016	1301
optimiz* and (technic* or program* or model*) and operating rooms	2010-2016 2010-2016	525

Nota: Adaptado de los resultados obtenidos de la base de datos EBSCO

Después de finalizada la búsqueda, se seleccionó la ecuación con la cual se trabajaría posteriormente y de donde se recopilaría la información de los artículos para el desarrollo del proyecto. La ecuación seleccionada fue la siguiente:

Tabla 2.

Ecuación de búsqueda seleccionada

ECUACIÓN	RESULTADOS
Optimiz* and (technic* or rogram* or model*) and operating rooms	525

5.3 Clasificación y Categorización de la Información

Para la siguiente etapa de la búsqueda se procedió a organizar y clasificar los 525 artículos obtenidos. La clasificación se realizó según el tipo de recursos, materia, tipo de publicación, editor, idioma y según el país. Se obtuvieron los siguientes resultados de la clasificación realizada:

Tabla 3.

Clasificación de los resultados según el tipo de recursos

TIPOS DE RECURSOS	RESULTADOS
Publicaciones académicas	430
Material de conferencias	22
Libros	13
Revistas	13
Informes	7
Críticas	3
Tesis	3
Publicaciones profesionales	2
Recursos electrónicos	1

Nota: Adaptado de los resultados obtenidos de la base de datos EBSCO

Tabla 4.*Clasificación de los resultados según la materia*

MATERIA	RESULTADOS
Operating rooms	93
Optimization	39
Surgery	35
Mathematical optimization	26
Scheduling	24
Hospitals	23
Simulation methods and model	23
operating room	21
Preoperative care	18
Computer simulation	17
Simulation	17
Mathematical models	16
Research	15
Health care	14
medical appointments and schedules	14
anesthesia	13
efficiency organizational	12
integer programming	11
stochastic processes	11
algorithms	10
efficiency	10
genetic algorithms	10
performance evaluation	10
medical care	9
outcome assessment	9
surgeons	9
health care tems	8
operating rooms personnel	8
perioperative care	8
quality assurance	8
analysis of health care markets	7
appointments and schedule	7
approximation theory	7
decision making	7
intensive care units	7
optimization techniques; programming	7
models; dynamic analysis	6
academic medical centers	6
decision support systems	6
health services administration	6

Nota: Adaptado de los resultados obtenidos de la base de datos EBSCO

Tabla 5.*Clasificación de los resultados según el tipo de publicación*

PUBLICACION	RESULTADOS
anaesthetist	10
anesthesia and analgesia	10
bmc health services research	10
computers and industrial engineering	10
european journal of operational research	10
artificial intelligence in medicine	9
health care management science	8
journal of the american college of surgeons	7
hospital topics	6
international journal of medical informatics	6
journal of physics	6
journal of surgical research	6
journal of vascular surgery	6
plos one	6
bmc medical informatics and decision making	5
journal of medical system	5
or spectrum	5
chemical engineering journal	4
computers and operations research	4
der chirurg	4
international journal of refrigeration	4
journal of biomedical informatic	4
surgical neurology international	4
american journal of surgery	3
Annales Francaises d'anesthesie et de reanimation	3
canadian journal of cardiology	3
clinical orthopaedics and related research	3
IEEE Transactions on Automation Science and Engineering	3
IEEE Transactions on Biomedical Engineering	3
IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics : part a	3
industrial engineer: ie	3
material management in health care	3
orthopedics	3
anz journal of surgery	2
mlo: medical laboratory observer	2
operations research	2

Nota: Adaptado de los resultados obtenidos de la base de datos EBSCO

Tabla 6.*Clasificación de los resultados según el editor*

EDITOR	RESULTADOS
elsevier science	74
ieee	37
springer science and business media b.v	35
elsevier ltd	29
lippincott williams and wilkins	25
elsevier b.v.	24
elsevier inc.	20
biomed central	19
elsevier	18
taylor and francis ltd	15
wiley- blackwell	9
american society of civil engineering	8
iop publishing	7
emerald group publishing limited	6
hindawi publishing corporation	6
public library of science	6
academic press inc.	5
baltzer science publisher	4
elsevier science publishing	4
kluwer academic/plenum publishers	4
sage publications	4
springer -verlag	4
health forum	3
institute of industrial engineering	3
ios press	3
Jannetti publications, inc.	3
sage publications inc.	3
academic press	2
excerpta medica	2
medknow	2
np communications, llc	2
shahid sadoughi university of medical science and health services	2
society for mining, metallurgy and exploration, inc	2
springer verlag	2
the federation	2
usiversitat politecnica de catalunya	2

Nota: Adaptado de los resultados obtenidos de la base de datos EBSCO

Tabla 7.*Clasificación de los resultados según el idioma*

IDIOMA	RESULTADOS
Inglés	470
Alemán	17
Francés	5

Nota: Adaptado de los resultados obtenidos de la base de datos EBSCO**Tabla 8.***Clasificación de los resultados según el país*

PAIS	RESULTADOS
Estados Unidos	26
Europa	11
Reino Unido e Irlanda	5
Italia	8
Alemania	3
España	3
China	4
Portugal	4
Brasil	2
Canadá	2
América Latina	2
Marruecos	2
Bélgica	1

Nota: Adaptado de los resultados obtenidos de la base de datos EBSCO

5.3 Análisis Preliminar de la Literatura

Narges Hosseini y Kevin M. Taaffe (Hosseini & Taaffe, 2014), abordan el problema mediante un método de bloques, balanceando el exceso y la insuficiencia de las salas o equipos utilizados. El método tradicional de asignación de bloques, con base en el promedio de horas anteriores de tiempos quirúrgicos, no tiene en cuenta la variabilidad en el caso del equipo, en general, a través de varias semanas para un día determinado. Sin embargo, las implicaciones de

equipo utilizados en exceso e infrautilizados son reales del equipo y deberían ser considerada la medición del rendimiento. La asignación de bloques se revisa y ajusta periódicamente pero esto depende de las políticas de cada hospital.

Xiao, Van Jaarsveld, Dong y Van de Klundert (Xiao, Van Jaarsveld, Dong, & Van de Klundert, 2016), presentan un método estocástico como solución al problema planteado y las mejoras alcanzables en el modelo a través de las cancelaciones de cirugías programadas para dar cabida a la demanda y evitar el exceso de horas extras. La planificación de las salas de cirugía se realiza con días de anticipación, pero se reajusta a medida que avanza el día debido a demoras inesperadas en el inicio de algunas cirugías. El objetivo de los autores es equilibrar los beneficios de la realización de las cirugías realizadas en horas extras y los efectos negativos de la cancelación de cirugías programadas.

La solución propuesta por Saadouli, Jerbi, Dammak y Bouaziz (2014), tiene en cuenta la incertidumbre en la cirugía, la duración de la recuperación y la capacidad que tiene cada uno de los recursos. En la primera fase, dieron una determinada holgura a la duración total de cada una de las cirugías en la lista de espera. A continuación proponen el modelo de la mochila para seleccionar las cirugías que serán programadas en un día seleccionado y las operaciones seleccionadas son asignadas a las diferentes salas de cirugía utilizando un modelo de programación entera mixta con el fin de optimizar los tiempos de atención y reducir los “*makespan*”. En la siguiente fase comparan el modelo de métodos discretos sugerido con las prácticas actuales para comparar el rendimiento global del modelo propuesto. De igual manera, Saadouli, Masmoudi, Jerbi y Dammak (2014), (Kacem, Laroche, & Roka, 2014), proporcionan dos métodos de programación lineal entera mixta. En la primera se le da una holgura a la duración total de la cirugía para hacer frente a las posibles horas extras. El segundo modelo trata

de equilibrar la carga total entre la habitación/día y las variaciones totales de cirugía durante la semana. Los dos modelos se resuelven usando CPLEX y luego se utiliza un modelo de simulación para evaluar la robustez de las soluciones aportadas.

Por otra parte, Baesler, Gatica y Correa (Baesler, Gatica, & Correa, 2015), representan el flujo de pacientes mediante un modelo de simulación de eventos discretos, en donde se considera la aleatoriedad asociada con las actividades primarias de todo el proceso, incluyendo el pre y post-operatorio, la cirugía, la configuración de la cirugía y la recuperación del paciente. Se implementó un algoritmo de búsqueda metaheurística, *simulated annealing*, y se conectó al modelo de simulación para obtener los mejores horarios. Además tuvieron en cuenta tres reglas de secuenciación: el tiempo de procesamiento más corto, el tiempo de procesamiento más largo y el método FIFO (First in, First out). Los autores Pulido, Gutiérrez, Aguirre, Ortega-Mier, García-Sánchez y Méndez (Pulido, Aguirre, Ortega-Mier, Garcia-Sanchez, & Mendez, 2014), desarrollan un modelo de programación entera mixta y una interfaz que facilita la programación de las operaciones para el siguiente día. Además de esto, también implementan un modelo de simulación para facilitar la evaluación de las diferentes políticas relacionadas con las salas de cirugía y cirujanos. Igualmente, Zheng Zhang, Xiaolan Xie y Na Geng (2014), formulan el problema como una optimización entera mixta a través de un modelo de simulación, proponiendo vías heurísticas de secuenciación y un algoritmo COMPASS combinado con un algoritmo de gradiente estocástico.

Van Essen, Hurink, Hartholt, Van den Akker (2012), resuelven el problema con un modelo de programación lineal entera cuyo objetivo es reducir al mínimo la desviación de las preferencias de los actores involucrados, el cual se puede utilizar para determinar una nueva programación a lo largo del día a medida que van cambiando las condiciones. Dicha

programación incluye todas las restricciones pertinentes que se puedan tener dentro de la programación.

Desde otro enfoque, Saremi, Jula, Elmekawy y Wang (2013), plantean tres métodos de optimización que se basan en la simulación para minimizar los tiempos de espera de los pacientes, tiempo de finalización de la cirugía y el número de cancelaciones de cirugía. En el estudio se integra el modelo de simulación de eventos discretos, en lo sucesivo denominado modelo de simulación, con metaheurísticas, se proponen tres métodos de optimización basados en la simulación, y mejorar aún más el rendimiento de los métodos propuestos mediante programación matemática. Los métodos propuestos abordan el problema de la programación de citas de un número predeterminado de pacientes de diferentes tipos con duraciones estocásticas en una de varias etapas. También se considera la disponibilidad de varios recursos, incluyendo quirófanos, camas de recuperación, y los recursos humanos, tales como cirujanos. Además, se consideran otras limitaciones dentro del modelo, tales como la compatibilidad de los recursos y el número de cirujanos disponibles para cada tipo de cirugía. Además, cada cirujano está limitado por una ventana de tiempo, lo que indica su disponibilidad en el horizonte de programación. De manera muy similar, Duma & Aringhieri (2015), basan su modelo de solución en una simulación híbrida y un modelo de optimización en el que se utiliza la simulación para modelar la estocasticidad inherente y de replicar el flujo de pacientes en el que opera el enfoque en línea para la gestión en tiempo real.

M'Hallah y Al-Roomi (2014), también consideran un modelo de programación en línea de las salas de cirugía a nivel operativo, excluyendo las cirugías de emergencia. En este artículo investigan como mejorar la sub y sobre utilización de los quirófanos mientras se mantiene el promedio actual de casos quirúrgicos. En concreto, se consideran dos métodos que reducen la

sobre utilización de las salas de cirugía: la cancelación de los casos quirúrgicos a nivel operativo en línea, y la limitación de la carga de trabajo prevista en el nivel operativo fuera de línea. Además, considera tres estrategias de gestión que supervisan y controlan el flujo de casos quirúrgicos con el objetivo de disminuir la variabilidad de la hora de finalización. Estas estrategias son: transferir un caso quirúrgico de una sala ocupada a una libre, utilizar una única cola para todas las salas de cirugía, y la adopción de un conjunto alternativo de salas de cirugía, donde los casos estén separados por tipo. En el documento se construye un modelo de simulación para cada estrategia, y compara el resultado del modelo a la de la situación actual.

El trabajo desarrollado por Holte (2013), se basa en el modelo introducido por Bienstock en su artículo *Histogram models for robust portfolio optimization*, en el cual se muestra la implementación de un algoritmo ejecutor/adversario para la optimización robusta. Holte realiza varias contribuciones a este trabajo. En primer lugar, introduce un modelo unificador para la programación cíclica y la programación robusta. En segundo lugar, crearon un enfoque de generación de fila y columna para resolver este modelo. En tercer lugar, se muestra cómo este enfoque puede ser visto como una implementación del algoritmo de ejecutor/ adversario.

Bajo la consideración de la cancelación de cirugías, Wang, Tang y Fung (2014), desarrollaron un modelo estocástico para minimizar los costos totales esperados de las cirugías. Para transformar el modelo estocástico en uno determinístico, utilizaron el método de aproximación promedio de la muestra. Para resolver el problema de programación entera, se desarrolló un algoritmo heurístico basado en la generación de columnas. Para el desarrollo del modelo se tuvo en cuenta la incertidumbre de la duración de la cirugía y las llegadas de emergencia. Un modelo similar de programación estocástica es formulado por Zhang, Xie y Geng (2013), con el fin de minimizar los costos generados por las esperas de los cirujanos y las

horas extras de utilización de las salas de cirugía. A su vez, Denton, Miller, Balasubramanian y Huschka (2010), presentan dos modelos para la optimización de la programación de las salas de cirugía para un día determinado. El primero es un programa estocástico lineal de dos etapas con decisiones binarias en la primera etapa y un recurso sencillo en la segunda etapa. El segundo es un equivalente robusto, en el que el objetivo es reducir al mínimo el costo asociado con la incertidumbre de la duración de la cirugía. Se describen los modelos matemáticos, los límites en la solución óptima, y metodologías de solución, incluyendo una heurística fácil de implementar.

Silva, de Souza, Saldanha y Burke (2015), proponen un modelo de programación heurístico basado en la programación entera para obtener soluciones factibles. En términos generales, la programación consiste en la selección de las intervenciones quirúrgicas a realizar en cada sala de operaciones disponibles junto con las fechas, horas de inicio y la asignación de los recursos necesarios.

En este trabajo, se presentan dos enfoques para hacer frente a esta complejidad. En primer lugar, se le da un enfoque heurístico basado en la búsqueda local que tiene en cuenta la formulación detallada del objetivo. Un segundo enfoque reduce la complejidad mediante la simplificación de la función objetivo. Esto permite el modelado y la solución del problema resultante como una programación lineal entera. Chow, Puterman, Salehirad, Huang y Atkins (2011), desarrollan un modelo de programación lineal entera para generar horarios de las salas de cirugía mejorados en términos del máximo esperado de ocupación de camas. Esta ocupación de camas esperada se calcula utilizando los tipos de cirugía esperados y después de esto, la ocupación de camas promedio por día se determina por medio de la simulación.

Wang, Tang, Pan y Yan (2014), abordan el problema en dos fases. La primera fase consiste en determinar si los pacientes pueden ser operados dentro del período de planificación y,

en caso afirmativo, determinar su fecha de la cirugía con el objetivo de maximizar la satisfacción general del paciente. En la segunda fase, para la programación de la cirugía se tiene en cuenta la secuencia de las cirugías y la sala de operaciones correspondiente, con el objetivo de minimizar los costos de operación del hospital, que incluye los costos fijos de apertura de salas de operaciones, costos de horas extras y costos de cobro. El problema se resuelve mediante el modelo de un algoritmo de optimización con enjambre de partículas discretas en combinación con reglas heurísticas.

Niu, Peng y ElMekkawy (2013), con el fin de satisfacer la demanda de los pacientes, desarrollan una simulación de eventos discretos para modelar el funcionamiento de las salas de cirugía. Para el modelo de simulación, se utiliza un método de búsqueda tabú utilizando técnicas mejoradas de búsqueda heurística. El objetivo es maximizar la cantidad de pacientes operados por día. Para el modelo se consideraron los siguientes recursos: las sillas en la sala de espera, las camas en la unidad de cuidados post-anestesia, el número de las salas de cirugía, camas disponibles para la admisión de pacientes en el día y la noche. En la investigación, se utiliza la búsqueda tabú como un optimizador del método de optimización metaheurístico. El optimizador elige un conjunto de valores como parámetros de entrada y utiliza la respuesta de regresar a la búsqueda para tomar la decisión y seleccionar la próxima prueba. La lista tabú se utiliza para evitar el camino de búsqueda cíclica.

Banditori, Cappanera y Visintin (2013), presentan un modelo de programación entera mixta. El modelo asume que los casos en lista de espera de un hospital pueden ser clasificados en grupos homogéneos de cirugía en base a los recursos que se esperan que sean necesarios para realizar el procedimiento (por ejemplo, la sala de operaciones, camas post-quirúrgicas). Lo cual produce una solución que indica, para cada día del mes y para cada intervalo de tiempo del día,

el número de casos para cirugías y el grupo de cirugía al cual pertenece cada caso. El modelo maximiza el rendimiento del paciente, teniendo en cuenta las fechas de vencimiento de los casos 'y permite el control de la lista de espera.

Roland, Di Martinelly, Riane y Pochet (2010), proponen un modelo de solución heurística basada en algoritmos genéticos para contrarrestar los grandes tiempos de funcionamiento inherentes a este problema de programación. Este estudio consiste en la programación de las actividades quirúrgicas bajo las restricciones del tiempo y la disponibilidad de recursos. Se desarrolla una formulación matemática que permite la eficiente asignación de los recursos disponibles, así como un algoritmo genético capaz de proporcionar buenas soluciones con mayor rapidez.

6. Formulación del Modelo

A partir de la revisión realizada a los estudios desarrollados por diferentes autores, en la cual se encontraron distintos métodos propuestos para resolver el problema de asignación de turnos de las salas de cirugía, se analizaron los más utilizados y se seleccionaron las técnicas con las cuales se resuelve el problema planteado en el trabajo.

Uno de los modelos más usados es el de asignación por bloques, en el cual se asignan bloques para el uso de las salas, basados no sólo en el uso total sino también de la variabilidad de la utilización de semana en semana, lo que resulta en un exceso de tiempo utilizado y sobreutilizado de las salas de cirugía.

En este modelo, se definen dos conjuntos, uno de los costos del tiempo sobre-utilizado y otro de los costos del tiempo que se está subutilizando de la siguiente manera: Si un grupo se le asigna más horas de las que utiliza en un día determinado, entonces el sistema incurre en un

costo de pies cúbicos por hora de tiempo de bloque no utilizado (tiempo subutilizado). Por el contrario, si un grupo se le asigna un menor número de horas que se utiliza en un día determinado, entonces el sistema incurre en un costo por hora de tiempo en el que no está disponible dentro del bloque (tiempo de sobreutilizado). El objetivo es asignar el bloque de tiempo por cada día de la semana para grupos de cirugía o cirujanos en función de la demanda histórica presentada por el servicio para que los horarios sean equilibrados y el costo de tiempo sobre-utilizado y subutilizado se reduzca al mínimo.

Para el modelo de programación lineal entera mixta, la función se formula con el objetivo de minimizar los siguientes tres costos:

- Costo de espera del cirujano, dado que es un recurso muy costoso. Este factor debe tener en cuenta el tiempo de espera mínimo que un cirujano necesita entre las operaciones (Tiempo de pausa).
- Costo de espera de las salas de cirugía (subutilización). El tiempo ocioso es el costo directo asociado con tener una sala de cirugía vacante, sin ningún procedimiento quirúrgico que se esté realizando.
- Costo de tiempo extra. El comienzo tardío da lugar a costos directos asociados con la necesidad de emplear horas extras cuando la cirugía termina más tarde que el final del turno establecido.

Para abordar el problema de programación de salas de cirugía, se tomó como base el modelo planteado por los autores Yu Wang, Jiafu Tang, Zhendong Pan & Chongjun Yan (2015), en el artículo Particle swarm optimization-based planning and scheduling for a laminar-flow

operating room with downstream resources, en el cual resuelven el problema en dos fases: la primera fase tiene como objetivo maximizar la satisfacción del cliente.

En esta fase se consideran tres factores fundamentales los cuales son: el tiempo del cual dispone el cirujano para realizar los procedimientos, el tipo de cirugía realizada a cada paciente y la sala de cirugía en la cual será realizada. Para esto, los autores consideran un horizonte de tiempo discreto de cinco días hábiles por semana. Además, asumen que el número de salas disponibles es j . Las salas de cirugía se dividen en tipos y cada uno de estos tipos tiene un número determinado de salas y también se considera el tiempo disponible para cirugías de cada una de las salas. El cirujano para cada procedimiento es asignado de antemano, por lo cual no es necesario considerarlo dentro del modelo. El tipo de sala en el cual se realizará cada procedimiento no puede ser elegido al azar debido a que no en todas las salas se pueden realizar todos los procedimientos. Además de estas consideraciones, los autores asumen que:

- Las fechas límites para la programación de cada cirugía es dada por el cirujano responsable de la misma y los pacientes deberán ser programados antes de la fecha límite estipulada.
- En los tiempos de duración de las cirugías se incluyen los tiempos de alistamiento de las salas, el tiempo de la cirugía y el tiempo de limpieza de la sala.
- La planeación de las cirugías para la semana siguiente se realiza el domingo anterior.

La segunda fase consiste en la realización de la secuenciación de las cirugías programadas para el día y asignación de la sala de cirugía para cada uno de los procedimientos teniendo en cuenta las camas de recuperación con las cuales se cuentan. El objetivo de esta

segunda fase es minimizar el costo operativo de la institución, costos de los tiempos extras y el costo de recuperación.

Para esta fase se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- El número de quirófano pertenecientes a cada categoría
- El número de camas de recuperación
- Al finalizar el procedimiento quirúrgica, el paciente debe ser trasladado

inmediatamente a una cama de recuperación

Además de esto se asume que:

- Las salas de cirugía pertenecientes a la misma categoría tienen la misma cantidad de horas de disponibilidad y cuentan con los mismos equipos quirúrgicos.
- Al incurrir en horas extras en las cirugías se generan de igual manera horas extras en las jornadas laborales del personal de cirugía.
- La preparación de las salas de recuperación se realiza con múltiples camas para cada categoría de salas de cirugía. El costo por unidad de las salas de recuperación es proporcional al número de camas que hayan en esta.
- Los tiempos de alistamiento de la sala y de limpieza dependen de cada uno de los casos y se hace la suposición que estos tiempos son determinísticos y se conocen de antemano.

6.1 Modelo

6.1.1 Fase 1:

- **Parametros:**

- i Número de pacientes, $i=1,\dots,N_1$
- j Número de salas de cirugía, $j=1,\dots,J$
- k Número de días del periodo de planeación, $k=1,\dots,K$
- p Número de cirujanos disponibles, $p=1,\dots,P$
- s Número de categorías de salas de cirugías, $s \in 1,\dots,S$
- n_s Número de salas de cirugía pertenecientes a cada categoría s
- F_p Disponibilidad diaria máxima de cada cirujano p
- $N_{i,p}=1$ Si el paciente i es atendido por el cirujano p , en caso contrario = 0
- $\theta_{i,s}=1$ Si el paciente i será asignado a la sala de cirugía de la categoría s , en caso contrario = 0
- d_i Duración pronosticada de la cirugía i
- c_i Día de hospitalización del paciente i
- e_i Fecha máxima para la cirugía del paciente i
- t Día en el que se realiza la programación
- T_s Disponibilidad regular de los quirófanos pertenecientes a cada categoría
- σ_s Desviación estándar de la disponibilidad de los quirófanos de cada categoría
- β Factor de holgura

- **Variable de Decisión:**

- $X_{i,k} = 1$ Si la cirugía i es programada en el día k , de lo contrario = 0

- **Modelo**

La fecha límite para la cirugía es dada por el cirujano dependiendo de la condición de cada paciente y deben ser tratados antes de dicha fecha. La relación entre el día de la cirugía, el día de la hospitalización y el plazo máximo se ilustran en la figura 1:

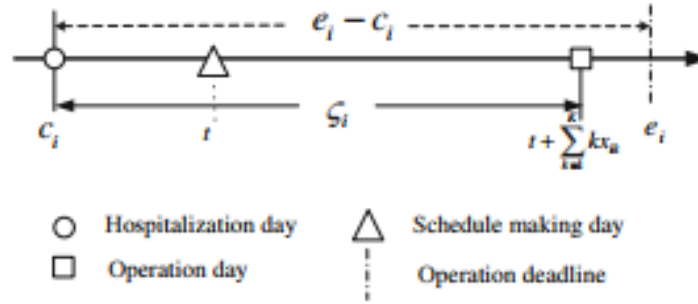


Figura 2. Relación entre algunos parámetros. Yu Wang, Jiafu Tang y Zhendong Pan (2015).

Particle swarm optimization-based planning and scheduling for a laminar-flow operating room with downstream resources.

Donde $e_i - c_i$ es el número máximo de días que puede esperar el paciente por la cirugía y ζ_i denota el número de días que el paciente espera por la cirugía, excluyendo el día de la cirugía.

Por lo tanto:

$$\zeta_i = t + \sum_{k=1}^K kx_{i,k} - c_i - 1$$

La satisfacción del paciente se expresa en la siguiente ecuación (1):

$$u_i(x) = [1 - \zeta_i / (e_i - c_i)] \quad (1)$$

Para cada paciente i , $z_i = \sum_{k=1}^K x_{i,k}$ denota si la cirugía i puede realizarse en el periodo de planificación estipulado. En caso de que $z_i = 0$ la satisfacción del paciente i también será igual a

0. En la figura 2 se ilustra la relación existente entre la función de satisfacción del cliente y el día en que se programa la cirugía.

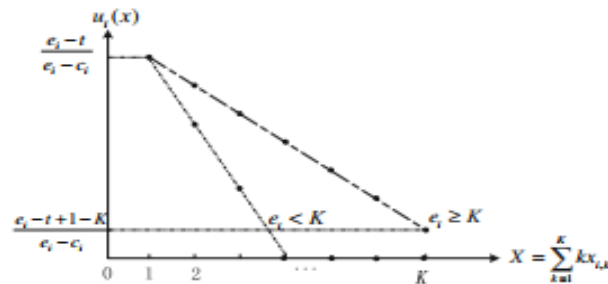


Figura 3. Relación entre la función de satisfacción del paciente y el día de la cirugía. Yu Wang, Jiafu Tang y Zhendong Pan (2015). Particle swarm optimization-based planning and scheduling for a laminar-flow operating room with downstream resources.

El grado de satisfacción del paciente está influenciado por la relación que existe entre el día en el que el paciente es hospitalizado y el día en que se realiza la programación. Por lo tanto, si el día de hospitalización y el día en que se realiza la programación es el mismo, entonces, $t_i = c_i$, el grado original de satisfacción $(e_i - t)/(e_i - c_i) = 1$; de otro modo, el grado es menor que 1.

La ecuación de satisfacción para todos los pacientes se expresa en la ecuación (2):

$$\sum_{i=1}^{N_i} u_i(x) \quad (2)$$

El modelo para el problema es

- **Función Objetivo**

$$\max \sum_{i=1}^{N_i} u_i(x) \quad (3)$$

La función objetivo (3) busca maximizar el grado de satisfacción de todos los pacientes.

- **Sujeto A**

$$\sum_{k=1}^{e_i-t} x_{i,k} = 1, e_i - t \leq K, \quad \forall_i \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^{e_i-t} x_{i,k} \leq 1, e_i - t > K, \quad \forall_i \quad (5)$$

Las restricciones (4) y (5) aseguran que todas las cirugías para las cuales el plazo límite no puede ser mayor al periodo de planeación sean realizadas durante dicho periodo, mientras que las demás cirugías se realizaran después.

$$\sum_{i=1}^{N_1} x_{i,k} \eta_{i,p} d_i \leq F_p, \quad \forall k, p \quad (6)$$

La restricción (6) asegura que la carga laboral asignada a cada cirujano no exceda el número máxima de horas en el día.

$$\sum_{i=1}^{N_1} x_{i,k} \theta_{i,s} d_i \leq (T_s - \beta \sigma_s) \cdot n_s, \quad \forall k, s \quad (7)$$

La restricción (7) asegura que en cada categoría de salas de cirugía, la duración general de todas las cirugías programadas para dicha sala, no exceda el número de horas disponibles cada día. Se considera un tiempo de holgura.

$$u_i(x) = \left[1 - \frac{S_i}{e_i - c_i}\right] \sum_{k=1}^K x_{i,k} \quad \forall i \quad (8)$$

La restricción (8) es la función de satisfacción para el paciente i .

$$x_{i,k} \in \{0,1\}, \quad \forall i, k \quad (9)$$

Con la restricción (9) se denota que la variable de decisión es binaria.

6.1.2 Fase 2:

- **Parámetros**

N_2	Número de pacientes en la lista de espera
W	Número de cirugías atendidas
S	Número de salas de cirugía pertenecientes a cada categoría
L	Número de camas en la sala de recuperación
pre_i^1	Tiempo de preparación de la operación i , incluida el alistamiento y la anestesia
p_i^1	Duración de la cirugía i
p_i^2	Duración del procedimiento de post anestesia del paciente i , esto es, tiempo de recuperación del paciente
$\eta_{iq}=1$	Si el cirujano atiende al paciente i , de lo contrario es 0
n_i^1	Tiempo de limpieza para la operación i

d_i^1	Duración total de la operación i en la sala de cirugía, en donde
	$d_i^1 = pre_i^1 + p_i^1 + n_i^1$
O	Tiempo en el cual la sala de cirugía y sala de recuperación abren cada día
C	Horas regulares de operación para cada sala de cirugía
α	Proporción de costo por unidad de tiempo extra y tiempo regular de la sala de cirugía ($\alpha > 1$)
β	Proporción de costo por hora de una cama de la sala de recuperación y costo regular en la sala de cirugía
M	Un número muy grande

• **VARIABLES DE DECISIÓN**

$x_{i,m} = 1$	Si el paciente i es asignado a la sala de cirugía m , en caso contrario = 0
$y_{i,k} = 1$	Si el paciente i es asignado a la cama de recuperación k , de lo contrario = 0
$z_{i,j}^1 = 1$	Si el tiempo de inicio de la cirugía del paciente i es más temprano que el paciente j ; de lo contrario 0
$z_{i,j}^2 = 1$	Si el tiempo de inicio de la recuperación del paciente i es más temprano que la del paciente j ; de lo contrario 0
t_i^1	Tiempo de inicio de la cirugía i en la sala de cirugía
t_i^2	Tiempo de inicio de la operación i en la sala de recuperación
	Por conveniencia, las variables medias se denotan de la siguiente forma:
H_m	Tiempo de cierre de la sala de cirugía m
Y_m	Duración de las horas extras de la sala de cirugía m
Q	Duración de funcionamiento de la sala de recuperación m

- **Función Objetivo**

$$\min \sum_{m=1}^s (\alpha Y_m + C_m) + \beta LQ \quad (10)$$

La función objetivo (10) busca minimizar los costos de operación del hospital, que incluye los costos regulares, los costos por tiempo extra y los costos de la sala de recuperación.

- **Sujeto A:**

$$t_j^1 + pre_j^1 \geq (t_i^1 + pre_i^1 + p_i^1) - M(3 - z_{ij}^1 - \eta_{iq} - \eta_{jq}) \quad i \neq j, \quad \forall q \quad (11)$$

La restricción (11) establece que un cirujano no puede operar a más de un paciente al mismo tiempo.

$$t_j^1 \geq (t_i^1 + d_i^1) - M(3 - z_{ij}^1 - x_{im} - x_{jm}) \quad i \neq j, \quad \forall m \quad (12)$$

La restricción (12) denota que una sala de cirugía no puede estar ocupada por más de un paciente al tiempo.

$$t_j^2 \geq (t_i^2 + p_i^2) - M(3 - z_{ij}^2 - y_{ik} - y_{jk}) \quad i \neq j, \quad \forall k \quad (13)$$

La restricción (13) implica que una cama de recuperación no puede ser ocupada por más de un paciente al mismo tiempo.

$$z_{ij}^1 + z_{ji}^1 = 1 \quad i > j \quad (14)$$

$$z_{ij}^2 + z_{ji}^2 = 1 \quad i > j \quad (15)$$

Las restricciones (14) y (15) son restricciones de integralidad.

$$t_j^1 \geq t_i^1 - M(1 - z_{ij}^1) \quad i \neq j \quad (16)$$

$$t_j^2 \geq t_i^2 - M(1 - z_{ij}^2) \quad i \neq j \quad (17)$$

Las restricciones (16) y (17) asegura que si una operación comienza antes que otra, la primera tiene un tiempo de inicio anterior.

$$t_i^2 = t_i^1 + pre_i^1 + p_i^1 \quad \forall i \quad (18)$$

La restricción (18) asegura que los pacientes son transferidos a la cama de recuperación inmediatamente después de la cirugía.

$$H_m \geq t_i^2 + n_i^1 - M(1 - x_{i,m}) \quad \forall i, m \quad (19)$$

La restricción (19) determina el tiempo de cierre de cada sala de cirugía.

$$Q = t_i^2 + p_i^2 - O \quad \forall i \quad (20)$$

La restricción (20) determina las horas de operación de las salas de recuperación.

$$Y_m \geq H_m - (C + O) \quad \forall m \quad (21)$$

$$Y_m \geq 0 \quad \forall m \quad (22)$$

Las restricciones (21) y (22) asegura que el intervalo de tiempo extra para la sala de cirugía es $Y_m = \text{Max}(0, H_m - (C + O))$.

$$\sum_{m=1}^S x_{im} = 1 \quad \forall i \quad (23)$$

La restricción (23) implica que un paciente es asignado a una única sala de cirugía.

$$\sum_{k=1}^L y_{ik} = 1 \quad \forall i \quad (24)$$

La restricción (24) implica que un paciente es asignado a una única sala de recuperación.

$$x_{im}, y_{ik}, z_{ij}^1, z_{ij}^2 \in \{0,1\} \quad \forall i, j, m, k \quad (25)$$

La restricción (25) es una restricción de integralidad.

$$t_i^1, t_i^2 \geq 0 \quad \forall i \quad (26)$$

La restricción (26) asegura que el tiempo de inicio de la operación para cada paciente no es anterior al tiempo de apertura de las salas de cirugía y que el inicio del tiempo de recuperación de cada paciente no es anterior al tiempo de apertura de la sala de recuperación.

7. Selección y Programación de Técnicas

En este capítulo se realizará la experimentación del modelo planteado anteriormente, en donde se utilizan datos propuestos por el autor aleatoriamente. Además de esto, se usará como herramienta principal un software para solución de modelos de programación lineal entera llamado GAMS y como herramienta de apoyo el Solver de Excel. El objetivo es comprobar el correcto funcionamiento del modelo mediante pruebas piloto para posteriormente ser probado con datos reales. La experimentación estará dividida en dos fases: la primera encargada de programar los pacientes en cada uno de los días del periodo y la segunda fase, generará la secuenciación de cada uno de los días según los resultados obtenidos en la fase anterior.

7.1 Fase 1 de Selección y Programación

En la fase uno, se aborda el problema con un Método Exacto y la técnica seleccionada para la solución del modelo fue Programación Lineal Entera, por lo cual se decide resolverlo utilizando como herramienta GAMS, ya que es el software adecuado para manejar dicha técnica.

Para conocer el comportamiento del modelo y hacer una prueba del funcionamiento del mismo, se realizó la programación primeramente en Excel y se resolvió mediante Solver tomando los siguientes parámetros:

Modelo Inicial:

- Periodo de planeación $k=2$ días
- Número de pacientes $i=5$
- Categorías de salas $S=2$
- Salas de cirugía por categoría $n_s=2$
- Numero de cirujanos $p=2$
- Disponibilidad diaria del cirujano F_p

Tabla 9.

Disponibilidad diaria del cirujano F_{p1} y F_{p2}

F_{p1}	10 horas
F_{p2}	7 horas

Tabla 10.

Duración pronosticada de la cirugía i d_i

Paciente 1	3 horas
Paciente 2	4 horas
Paciente 3	2 horas
Paciente 4	4 horas
Paciente 5	3 horas

Tabla 11.*Día de hospitalización del paciente i c_i*

Paciente 1	1
Paciente 2	1
Paciente 3	1
Paciente 4	1
Paciente 5	1

Tabla 12.*Fecha máxima para la cirugía del paciente i e_i*

Paciente 1	2
Paciente 2	2
Paciente 3	2
Paciente 4	2
Paciente 5	2

Día en el que se realiza la programación $t=1$ **Tabla 13.***Disponibilidad regular de cada sala de cirugía T_s*

Sala 1	20 horas
Sala 2	20 horas
Sala 3	20 horas
Sala 4	20 horas

- Desviación estándar de la disponibilidad de los quirófanos de cada categoría $\sigma_s=1$
- Factor de holgura $\beta=0,8$

Se realizaron variaciones a los parámetros de entrada del modelo inicial, para conocer cómo se comporta y poder observar la robustez del problema con datos que se aproximen un poco más a la realidad de las instituciones de salud.

Variación 1: Se aumentó el número de días de la programación, pasó de 2 a 7 días. Con esta variación se observó que al aumentar el horizonte de planeación de 2 a 7 días crece significativamente el problema, puesto que pasa de 10 a 35 variables de decisión. La restricción (5) no tiene variación alguna, pues depende del número de pacientes y este parámetro no sufrió ninguna modificación, mientras las restricciones (6) y (7) pasan de tener 4 variables a tener 14. Se obtuvo la siguiente programación:

Variación 2: Además de la variación anterior al modelo, se aumentaron el número de pacientes de 5 a 10 y se mantuvo el mismo número de días de la programación ($k=7$ días), para observar cómo se realiza la distribución de los turnos quirúrgicos a través de los días de la programación.

Las restricciones (6) y (7) se mantienen con el mismo número de variables debido a que no se aumentaron los días de la programación. La restricción (5) aumenta en 5 variables, es decir de 5 a 10 debido al aumento de los pacientes.

Variación 3: Se realizó una siguiente variación en la cual se aumentaron el número de cirujanos, pasando de 1 a 3, y cada uno con las siguientes disponibilidades diarias:

Tabla 14.

Cirujano vs Disponibilidad en horas

CIRUJANO	DISPONIBILIDAD EN HORAS
1	10
2	8
3	12

Adicional a esto, se aumentó el número de categorías de salas de cirugía a 3.

La restricción (5) no varia, pues no depende de la cantidad de cirujanos ni de las categorías de salas, sino de la cantidad de pacientes. Las restricciones (6) y (7) por el contrario pasan de tener 14 variables a tener 21, pues la (6) se ve afectada por el aumento de cirujanos y la (7) por la cantidad de categorías de salas.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos en cada una de las variaciones realizadas al modelo inicial:

Tabla 15.*Resultados de cada variación realizada al modelo inicial*

	MODELO INICIAL (k=2 días, i=5 pacientes)	VARIACIÓN 1 (k=7 días, i=5 pacientes)	VARIACIÓN 2 (k=7 días, i=10 pacientes)	VARIACIÓN 3 (k=7 días, i=10 pacientes, p= 3 cirujanos, s= 3 categorías salas)
FUNCIÓN OBJETIVO	4	3,166667	5,66667	6,333333
VARIBLES DE DECISIÓN	10 variables	35 variables	70 variables	70 variables
RESTRICCIÓN (5)	5 variables	5 variables	10 variables	10 variables
RESTRICCIÓN (6)	4 variables	14 variables	14 variables	21 variables
RESTRICCIÓN (7)	4 variables	14 variables	14 variables	21 variables

Los resultados con cada una de las variaciones fueron los esperados, puesto que conocia de antemano que al aumentar al menos uno de los datos aumentaria proporcionalmente el numero de recorridos que el modelo deberia hacer a lo largo de cada una de las restricciones.

Además, la programación obtenida para cada día fue la siguiente:

Tabla 16.*Modelo Inicial*

DÍA DE LA PROGRAMACIÓN	PACIENTES ASIGNADOS
Día 1	1, 3,4 y 5
Día 2	2

En este caso, se puede observar que el modelo se encargó de asignar la mayor cantidad de pacientes posibles al día 1 con el propósito de mejorar el tiempo de respuesta a las necesidades mejorando así la satisfacción total de los pacientes.

Tabla 17.

Variación 1

DIA DE LA ROGRAMACIÓN	PACIENTES ASIGNADOS
Día 1	1, 3, 4, 5
Día 2	2
Día 3	-
Día 4	-
Día 5	-
Día 6	-
Día 7	-

Igual que en el modelo inicial, la programación se comporta del mismo modo. Además se puede observar que es una cantidad muy pequeña de pacientes a programar comparado con los recursos disponibles.

Tabla 18.

Variación 2

DIA DE LA ROGRAMACIÓN	PACIENTES ASIGNADOS
Día 1	1, 3, 5, 6, 7, 10
Día 2	2, 4
Día 3	8,9
Día 4	-
Día 5	-
Día 6	-
Día 7	-

En esta variación al aumentar la cantidad de pacientes, el modelo se ve obligado a programar en una mayor cantidad de días, sin dejar de lado el objetivo principal que es maximizar la satisfacción, por lo cual programa solamente en los primeros días.

Tabla 19.

Variación 3

DÍA DE LA PROGRAMACIÓN	PACIENTES ASIGNADOS
Día 1	1, 2, 3, 4, 6, 7, 9, 10
Día 2	5,8
Día 3	-
Día 4	-
Día 5	-
Día 6	-
Día 7	-

Al aumentar el número de cirujanos, se observa que el modelo nuevamente programa una gran cantidad de pacientes en el día 1 puesto que se amplía la disponibilidad de médicos el cual era el parámetro que limitaba en la variación 2, así se contara con una gran cantidad de horas disponibles.

Después de comprobar el funcionamiento del modelo por medio del Solver de Excel, se programó utilizando la herramienta GAMS (Ver Anexo 1). Este código permite mirar el deadline de cada uno de los pacientes en espera y programarlos teniendo en cuenta la carga máxima de los cirujanos y la disponibilidad de las salas de cirugía, haciendo que el día en que

sea programado el paciente no sea mayor a su deadline y tratando que el tiempo de espera del mismo sea el menor posible, ya que esto hará que la satisfacción del paciente sea mayor lo cual es el fin de la función objetivo. Se realizó una variación en la cantidad de pacientes, se pasó de 10 a 15 pacientes, para observar cómo funcionaba el modelo a medida que se hacía más robusto. Además de esto se amplió el plazo máximo de las fechas de cirugía, pasando del día 7 al día 10 como fecha máxima de cirugía.

Tabla 20.

Duración pronosticada de la cirugía i d_i

Paciente 1	3 horas
Paciente 2	4 horas
Paciente 3	7 horas
Paciente 4	4 horas
Paciente 5	3 horas
Paciente 6	5 horas
Paciente 7	3 horas
Paciente 8	4 horas
Paciente 9	6 horas
Paciente 10	2 horas
Paciente 11	5 horas
Paciente 12	5 horas
Paciente 13	4 horas
Paciente 14	6 horas
Paciente 15	3 horas

Los resultados obtenidos mediante el programa fueron los siguientes:

Tabla 21.

Programación:

DIA DE LA PROGRAMACIÓN	PACIENTES ASIGNADOS
Día 1	1, 7, 10, 13, 15
Día 2	4, 8, 9
Día 3	5, 6, 11, 12
Día 4	3, 14
Día 5	2
Día 6	-
Día 7	-

Se observa en los resultados mostrados en la tabla anterior que se utilizaron más días del periodo de planeación para la programación de los pacientes teniendo en cuenta que se aumentó la cantidad de los mismos. Una constante en los resultados obtenidos hasta el momento es la asignación siempre en los primeros días del periodo. Al agotar la disponibilidad de un día, el modelo programa en el día subsiguiente puesto que su objetivo es maximizar la satisfacción de los pacientes mediante la disminución de los días de espera para ser atendidos, por dicho motivo a los últimos días no se asigna ningún paciente si aún se cuenta con disponibilidad en los días anteriores a este.

Tabla 22.*Valor de Z*

Z=	11.413
----	---------------

7.2 Fase 2 de Selección y Programación

Para esta fase, se utilizó un Método heurístico, a partir de la revisión de literatura y del desarrollo del modelo en su segunda fase, se decidió trabajarlo como un problema de Programación Lineal Entera. La solución del modelo se realizó con la ayuda del software GAMS y para realizar una validación del correcto funcionamiento de la programación, se contó con el apoyo del Solver Premium de Excel.

Los datos utilizados para modelar el problema de la fase 2 se obtuvieron de los resultados arrojados por el Excel (solver) programado en la fase 1 (variación 2). La programación obtenida fue la siguiente:

Tabla 23.*La programación obtenida*

DIA DE LA PROGRAMACIÓN	PACIENTES ASIGNADOS
Día 1	1, 3, 5, 6, 7, 10
Día 2	2, 4
Día 3	8,9
Día 4	-
Día 5	-
Día 6	-
Día 7	-

Con esta programación se procedió a desarrollar la fase 2 en Excel (Solver Premium).

Adicional a la programación se utilizaron los siguientes datos:

- Número de cirujanos asistentes W : 3
- Número de salas de cirugía pertenecientes a una categoría en particular S : 4
- Número de camas en la sala de recuperación L : 5
- Hora en la que abren diariamente las salas de cirugía y la sala de recuperación O :

6 a.m.

- Horas regulares de funcionamiento de cada sala de cirugía C : 12
- Relación de costos por unidad de horas extras y tiempo regular de las salas de

cirugía α : 1,25

- Relación de costos por hora de la sala de recuperación y costo regular de la sala de

cirugía β : 0,5

- Número muy grande M : 9999999999

Tabla 24.

Hora de cierre de las salas de cirugía H_m :

H_1	18
H_2	20
H_3	18
H_4	15

Tabla 25.

Duración de las horas extras para las salas de cirugía Y_m :

Y_1	5
Y_2	3
Y_3	4
Y_4	4

- Duración del funcionamiento de la sala de recuperación Q : 12

Los datos obtenidos de Z en Excel (Solver Premium) fueron los siguientes:

Tabla 26.

Datos obtenidos de Z

	Z
K=1	455,5
K=2	478
K=3	478
K=4	-
K=5	-
K=6	-
K=7	-

La programación generada para cada uno de los días se relaciona a continuación:

K=1

Tabla 27.

Asignación de pacientes a las sala de cirugía

Pacientes	Sala de Cirugía			
	1	2	3	4
1			X	
3			X	
5	X			
6				X
7		X		
10		X		

Tabla 28.

Asignación de pacientes a la cama de recuperación

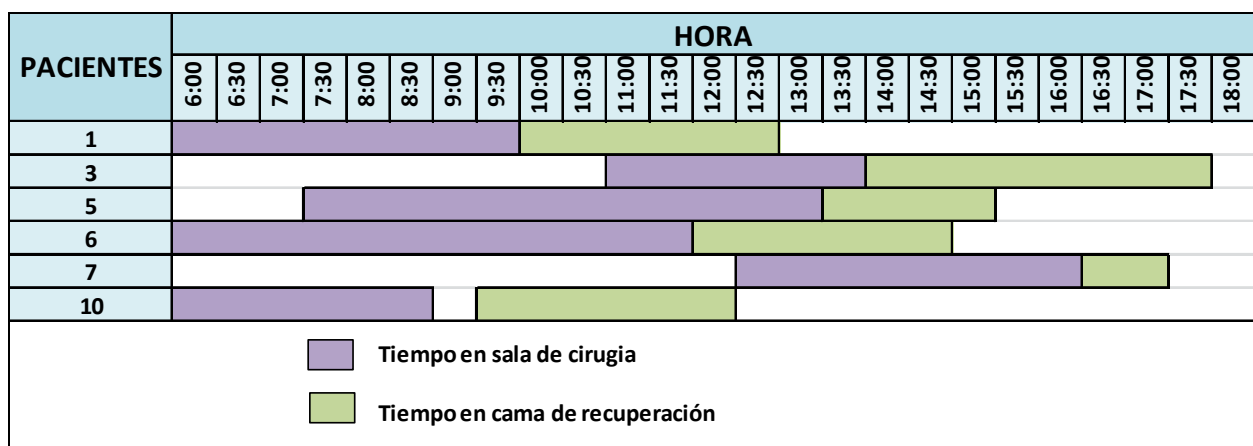
PACIENTES	CAMA DE RECUPERACIÓN				
	1	2	3	4	5
1					X
3			X		
5		X			
6				X	
7				X	
10		X			

Tabla 29.*Hora de inicio de la operación en la sala de cirugía*

PACIENTE	HORA DE INICIO
1	6:00 am
3	11:00 am
5	7:30 am
6	6:00 am
7	12:30 pm
10	6:00 am

Tabla 30.*Hora de inicio en la cama de recuperación*

PACIENTE	HORA DE INICIO
1	10:00 am
3	2:00 pm
5	1:30 pm
6	12:00 pm
7	4:30 pm
10	9:30 am

*Figura 4.* Hora de inicio en la sala de cirugía y en la cama de recuperación para el día 1

Se puede ver que el modelo programó equitativamente pacientes a todas las salas con el fin de evitar que se generaran horas extras que pudieran aumentar los costos de operación. En cuanto a las camas de recuperación se tuvo una cama sin ningún paciente programado. Se cumplieron las horas de finalización de la cirugía e inicio de la recuperación de acuerdo con los tiempos planteados de duración de los procedimientos de cada paciente.

K=2

Tabla 31.

Asignación de pacientes a las salas de cirugía

PACIENTE	SALA DE CIRUGÍA			
	1	2	3	4
2			X	
4	X			

Tabla 32.

Asignación de pacientes a la cama de recuperación

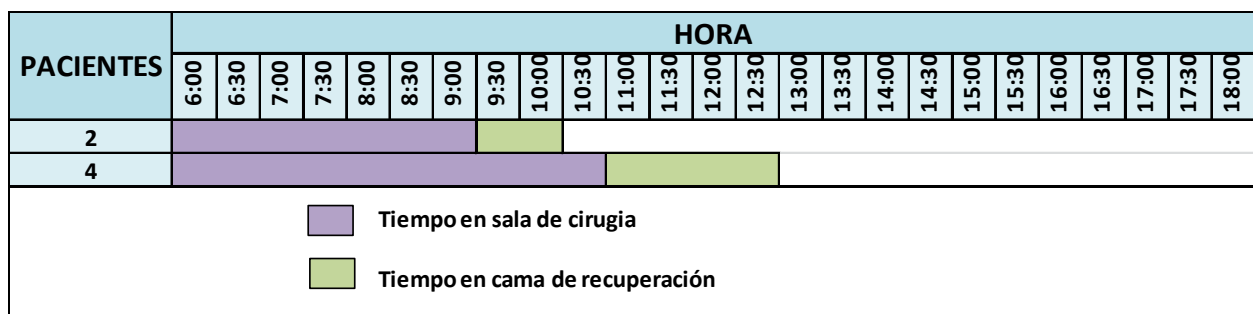
PACIENTE	CAMA DE RECUPERACIÓN				
	1	2	3	4	5
2	X				
4	X				

Tabla 33.*Hora de inicio de la operación en la sala de cirugía*

PACIENTE	HORA DE INICIO
2	6:00 am
4	6:00 am

Tabla 34.*Hora de inicio en la cama de recuperación*

PACIENTE	HORA DE INICIO
2	9:30 am
4	11:00 am

*Figura 5. Hora de inicio en la sala de cirugía y en la cama de recuperación para el día 2.*

Para este día de la planeación, solo se tenían dos pacientes los cuales se programaron en salas de cirugía diferentes pero en la misma sala de recuperación puesto que las horas de duración de cirugía son diferentes así que no se cruzaban las horas de entrada a recuperación.

K=3**Tabla 35.***Asignación de pacientes a las salas de cirugía*

PACIENTE	SALA DE CIRUGÍA			
	1	2	3	4
8		X		
9			X	

Tabla 36.*Asignación de pacientes a la cama de recuperación*

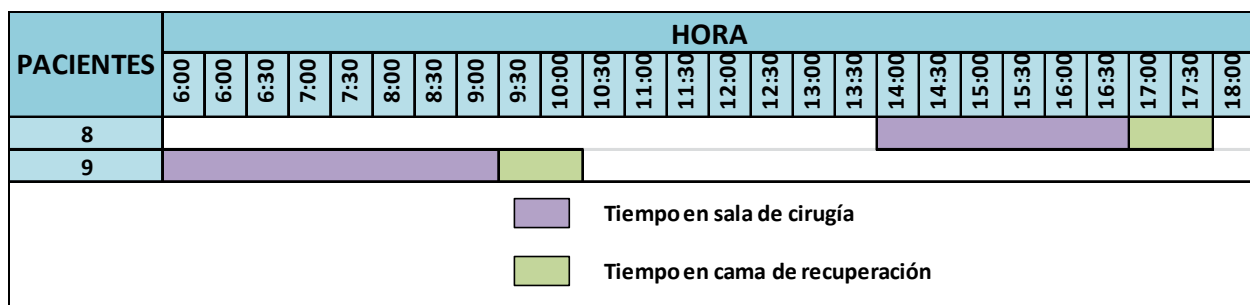
PACIENTE	CAMA DE RECUPERACIÓN				
	1	2	3	4	5
8			X		
9			X		

Tabla 37.*Hora de inicio de la operación en la sala de cirugía*

PACIENTE	HORA DE INICIO
8	14:00 pm
9	6:00 am

Tabla 38.*Hora de inicio en la cama de recuperación*

PACIENTE	HORA DE INICIO
8	5:00 pm
9	9:30 am

*Figura 6.* Hora de inicio en la sala de cirugía y en la cama de recuperación para el día 3.

Para el día 3 de la programación, el modelo siguió el mismo patrón que el día anterior.

Después de comprobar el correcto funcionamiento del modelo planteado para la fase 2 con la ayuda del Solver Premium de Excel, se desarrolla el código como un modelo de Programación Lineal Entera usando como herramienta el Software GAMS (Ver Anexo 2). Este código se encarga de realizar la secuenciación de la programación realizada por el código de la Fase 1. Lo primero que realiza es la asignación de cada paciente a una única sala de cirugía, asegurando que el cirujano no opere a más de un paciente a la vez y que en la sala no se opere más de un paciente al mismo tiempo. Además de esto se supone que el paciente es transferido a la cama de recuperación inmediatamente termina su cirugía y que en una cama de recuperación

solo puede ser asignado un único paciente a una hora determinada. El objetivo de este código es minimizar los costos de funcionamiento de las salas de cirugía. Los datos que se obtuvieron a partir de la programación realizada con el software fueron los siguientes:

K=1

Tabla 39.

Asignación de pacientes a las sala de cirugía

PACIENTES	SALA DE CIRUGIA			
	1	2	3	4
1				X
3				X
5	X			
6			X	
7		X		
10		X		

Tabla 40.

Asignación de pacientes a la cama de recuperación

PACIENTES	CAMA DE RECUPERACIÓN				
	1	2	3	4	5
1	X				
3			X		
5				X	
6		X			
7					X
10					X

Tabla 41.

Hora de inicio de la operación en la sala de cirugía

PACIENTE	HORA DE INICIO
1	10:30 am
3	6:00 am
5	7:30 am
6	8:30 pm
7	12:30 pm
10	6:00 am

Tabla 42.

Hora de inicio en la cama de recuperación

PACIENTE	HORA DE INICIO
1	2:30 pm
3	9:00 am
5	1:30 pm
6	2:30 pm
7	4:30 pm
10	9:30 am

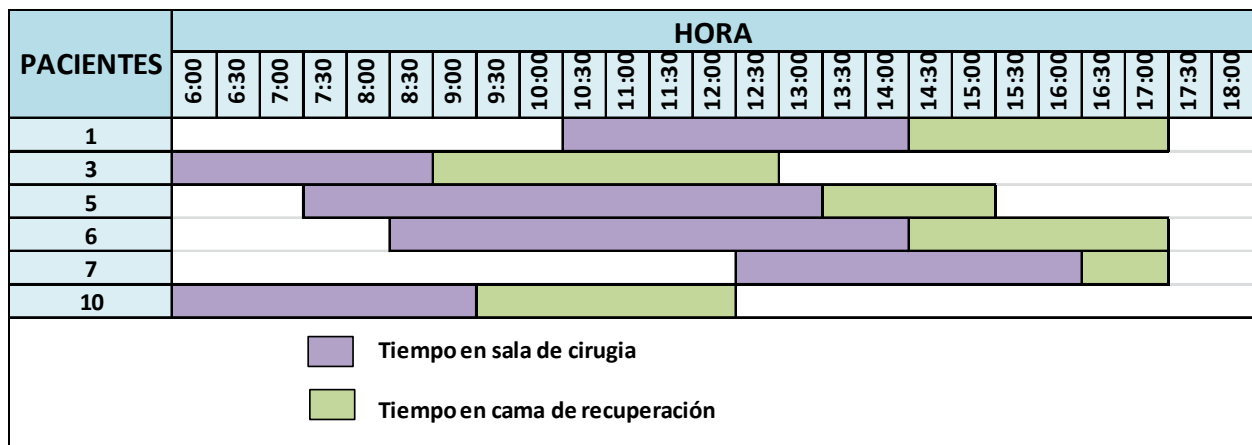


Figura 7. Hora de inicio en la sala de cirugía y en la cama de recuperación para el día 1

El código programado en GAMS tuvo un comportamiento similar al programado en Excel como prueba, se obtuvieron variaciones solo en algunos pacientes. Se observa una asignación equitativa de pacientes a las salas de cirugía y camas de recuperación. La hora de finalización de la última cirugía es la misma que se obtuvo en el excel al igual que la hora de finalización de la recuperación del último paciente.

K=2

Tabla 43.

Asignación de pacientes a las salas de cirugía

PACIENTE	SALA DE CIRUGÍA			
	1	2	3	4
2		X		
4	X			

Tabla 44.

Asignación de pacientes a la cama de recuperación

PACIENTE	CAMA DE RECUPERACIÓN				
	1	2	3	4	5
2			X		
4	X				

Tabla 45.

Hora de inicio de la operación en la sala de cirugía

PACIENTE	HORA DE INICIO
2	6:00 am
4	6:00 am

Tabla 46. Hora de inicio en la cama de recuperación

PACIENTE	HORA DE INICIO
2	9:30 am
4	11:00 am

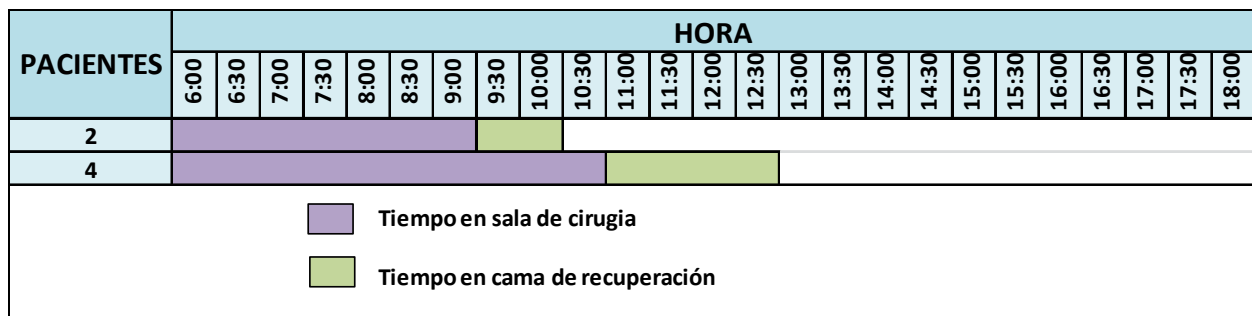


Figura 8. Hora de inicio en la sala de cirugía y en la cama de recuperación para el día 2

Al solo tener dos pacientes programados para el día 2, la asignación de pacientes se da en diferentes salas y diferentes camas de recuperación.

K=3**Tabla 47.***Asignación de pacientes a las salas de cirugía*

PACIENTE	SALA DE CIRUGÍA			
	1	2	3	4
8		X		
9	X			

Tabla 48.*Asignación de pacientes a la cama de recuperación*

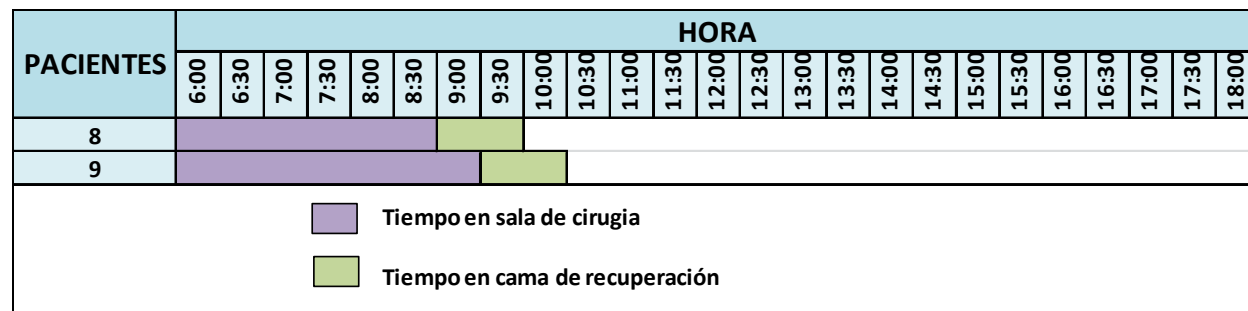
PACIENTE	CAMA DE RECUPERACIÓN				
	1	2	3	4	5
8			X		
9	X				

Tabla 49.*Hora de inicio de la operación en la sala de cirugía*

PACIENTE	HORA DE INICIO
8	6:00 am
9	6:00 am

Tabla 50.*Hora de inicio en la cama de recuperación*

PACIENTE	HORA DE INICIO
8	9:00 am
9	9:30 am

*Figura 9.* Hora de inicio en la sala de cirugía y en la cama de recuperación para el día 3

Los resultados obtenidos para el tercer día de la programación se asemejan a los del segundo día, con la variación de la duración de los procedimientos de los pacientes asignados.

8. Evaluación de las Técnicas

El modelo desarrollado en el proyecto fue evaluado con el funcionamiento de las salas de cirugía de la IPS Serviclínicos Dromédica S.A., de donde se obtuvieron de la primera semana del mes de Enero de 2017. Es importante aclarar que en esta etapa no se compararan las técnicas utilizadas, sino que será sometido el modelo a una situación con datos reales, obteniendo una programación optimizada por el modelo frente a la programación realizada en la institución. Además de esto, tampoco se hará posible la comparación de los costos generados por la

programación puesto que la empresa no cuenta con dichos datos sino que se hará una evaluación de las secuencias programadas por cada una de las partes.

Por lo descrito anteriormente, se optó por crear un indicador que nos permita realizar dicha comparación. El objetivo del indicador será medir el porcentaje de utilización de las salas de cirugía en cada una de las programaciones. Se calculará de la siguiente manera:

$$\% \text{ Utilización} = \frac{\text{cantidad de horas programadas}}{\text{cantidad de horas disponibles}} * 100$$

Los resultados que se obtengan los cuales se relacionan a continuación:

Fase 1:

- **Número de pacientes:** 45 pacientes
- **Número de salas de cirugía:** 4 salas de cirugía
- **Número de días de la planeación:** 7 días
- **Número de cirujanos:** 11 Cirujanos
- **Numero de categorías de salas:** 1 categoría
- **Número de salas pertenecientes a cada categoría:** 4 salas de cirugía

Tabla 51.*Carga diaria según Médico.*

	MEDICO	DISPONIB. DIARIA
1	CUERVO	8 horas
2	RAMIREZ	8 horas
3	SORZANO	6 horas
4	PARRA	12 horas
5	ORTIZ	8 horas
6	SANCHEZ	8 horas
7	BARCO	6 horas
8	MENDIETA	8 horas
9	ILEANA	10 horas
10	HOLMAN	6 horas
11	FREIRE	6 horas

*Nota: Adaptada de Serviclínicos Dromédica S.A.***Tabla 52.***Cirujano que opera a cada paciente, Duración de la cirugía, Día de hospitalización del paciente y Día máximo para la cirugía*

	PACIENTE	CIRUJANO	DURACION DE LA CIRUGIA	DIA DE HOSPITALIACION	DIA MAXIMO DE CIRUGIA
1	Pedro Franco	CUERVO	1 HORA	1	3
2	Octavio Pinzon	CUERVO	1 HORA	1	3
3	Miguel Schiller	CUERVO	2 HORAS	1	2
4	Jesus Amaya	RAMIREZ	1 HORA 15 MIN	1	2
5	Nicolas Moreno	SORZANO	1 HORA	1	4
6	Julian Caballero	PARRA	1 HORA	1	3
7	Fabian Barrera	ORTIZ	1 HORA	1	7
8	Betty Diaz	SANCHEZ	1 HORA	1	5
9	Maria Miranda	SANCHEZ	1 HORA + 30	1	5

	PACIENTE	CIRUJANO	DURACION	DIA DE HOSPITALIACION	DIA MAXIMO DE CIRUGIA
			DE LA CIRUGIA		
			MIN		
10	Leidy Delgado	PARRA	2 HORAS	1	2
11	Edinson Parada	PARRA	1 HORA	1	4
12	Rafel Gonzalez	PARRA	2 HORAS 30	1	3
			MIN		
13	Liliana Duque	BARCO	1 HORA	1	7
14	Daisy Gonzalez	ORTIZ	2 HORAS	1	7
15	Luddy Martinez	ORTIZ	2 HORAS 15	1	7
			MIN		
16	Elvia Morales	MENDIETA	2 HORAS	1	5
17	Claudia Rueda	ILEANA B.	1 HORA	1	3
18	Beatriz Calderon	ILEANA B.	1 HORA	1	4
19	Mauricio Garcia	ILEANA B.	1 HORA	1	6
20	Jhonatan Palomino	PARRA	2 HORAS 30	1	2
			MIN		
21	Antonio Peña	PARRA	1HORA 30	1	3
			MINT		
22	William Villafañe	PARRA	1 HORA	1	5
23	Maria Tellez	PARRA	1 HORA	1	5
24	Juan Gutierrez	PARRA	2 HORAS	1	4
25	Mario Laya	ORTIZ	2 HORAS	1	6
26	Yuli Espinosa	BARCO	2 HORAS	1	7
27	Yolima Forero	MENDIETA	30 MTOS	1	5
28	Rafael Gonzalez	SANCHEZ	2 HORAS	1	6
29	Cesar Corredor	SANCHEZ	1 HORA	1	7
30	Bray Briceño	CUERVO	3 HORAS	1	2
31	Marlene Torres	PARRA	2 HORAS	1	4
32	Shirley Rios	PARRA	1 HORA	1	6
33	Adriana Ibañez	PARRA	2 HORAS	1	5
34	Miguel Diaz	PARRA	1 HORA 30	1	4
			MTOS		
35	Juliana Carvajal	PARRA	1 HORA 30	1	3
			MTOS		
36	Wilson Saavedra	PARRA	1 HORA	1	6

	PACIENTE	CIRUJANO	DURACION DE LA CIRUGIA	DIA DE HOSPITALIACION	DIA MAXIMO DE CIRUGIA
37	Kimberly Landazabal	PARRA	2 HORAS	1	2
38	Arelis Rios	PARRA	2 HORAS 30 MIN	1	4
39	Viviana Esparragos	ORTIZ	1 HORA	1	7
40	Edson Paez	PARRA	2 HORAS	1	2
41	Andres Pereira	PARRA	1 HORA	1	5
42	Wuilver Beltran	HOLMAN	3 HORAS	1	2
43	Juan Vandra	PARRA	1 HORA	1	5
44	Celia Diaz	PARRA	3 HORAS	1	4
45	Luis Celis	FREIRE	3 HORAS	1	6

Nota: Adaptada de Serviclínicos Dromédica S.A.

- **Día de la programación:** Domingo (día 1)
- **Horas regulares disponibles de las salas:** 20 horas diarias
- **Desviación estándar de las horas disponibles de las salas de cirugía:** 3 horas
- **Factor de holgura:** 0.8

Tabla 53.

Programación realizada por la clínica

<i>FECHA</i>	<i>PRIMER APELLIDO DEL USUARIO</i>	<i>SEGUNDO APELLIDO DEL USUARIO</i>	<i>PRIMER NOMBRE DEL USUARIO</i>	<i>SEGUNDO NOMBRE DEL USUARIO</i>	<i>CIRUJANO</i>
02/01/2017	FRANCO	OSSES	PEDRO	CONSTANTINO	CUERVO
02/01/2017	PINZON	SEPULVEDA	OCTAVIO		CUERVO
02/01/2017	SCHILLER	GUARNIZO	MIGUEL	ANDRES	CUERVO
02/01/2017	AMAYA	ACOSTA	JESUS		RAMIREZ
02/01/2017	MORENO	CASTRO	NICOLAS	FERNANDO	SORZANO

<i>FECHA</i>	<i>PRIMER APELLIDO DEL USUARIO</i>	<i>SEGUNDO APELLIDO DEL USUARIO</i>	<i>PRIMER NOMBRE DEL USUARIO</i>	<i>SEGUNDO NOMBRE DEL USUARIO</i>	<i>CIRUJANO</i>
02/01/2017	FRANCO	OSÉS	PEDRO	CONSTANTINO	CUERVO
02/01/2017	CABALLERO	PALOMINO	JULIAN		PARRA
02/01/2017	BARRERA	CARO	FABIAN	SANTIAGO	ORTIZ
02/01/2016	DIAZ	MEZA	BETTY		SANCHEZ
02/01/2016	MIRANDA	SANDOVAL	MARIA	ALEJANDRA	SANCHEZ
03/01/2017	DELGADO	TARAZONA	LEIDY	CAROLINA	PARRA
03/01/2017	PARADA		EDINSON		PARRA
03/01/2017	GONZALEZ		RAFAEL	LEONARDO	PARRA
03/01/2017	DUQUE	MUÑOZ	LILIANA		BARCO
03/01/2017	GONZALEZ	GARCIA	DAISY	GISELA	ORTIZ
04/01/2017	MARTINEZ		LUDDY	ZULAY	ORTIZ
04/01/2017	MORALES		ELVIA	ROSA	MENDIETA
04/01/2017	RUEDA	PARRA	CLAUDIA	LUCIA	ILEANA B.
04/01/2017	CALDERON	RUEDA	BEATRIZ		ILEANA B.
04/01/2017	GARCIA	RANGEL	MAURICIO		ILEANA B.
04/01/2017	PALOMINO	GARCIA	JHONATHAN		PARRA
04/01/2017	PEÑA	MANTILLA	ANTONIO	MARIA	PARRA
04/01/2017	VILLAFANE	VILLAMIZAR	WILLIAM	ENRIQUE	PARRA
04/01/2017	TELLEZ	CELIS	MARIA	BENITA	PARRA
04/01/2017	GUTIERREZ	OSMA	JUAN	BAUTISTA	PARRA
<u>05/01/2017</u>	LAYA	LOPEZ	MARIO	ALEJANDRO	ORTIZ
05/01/2017	ESPINOSA	QUINTERO	YULI	ANDREA	BARCO
05/01/2017	FORERO	BARON	YOLIMA		MENDIETA
05/01/2017	GONZALEZ	VOLLLMUTH	RAFAEL	LEONARDO	SANCHEZ
05/01/2017	CORREDOR	GONZALEZ	CESAR	AUGUSTO	SANCHEZ
<i>05/01/2017</i>	BRICEÑO	ORTIZ	BRAY	JAVIER	CUERVO
06/01/2017	TORRES	RUEDA	MARLENE		PARRA
06/01/2017	RIOS	RAMIREZ	SHIRLEY		PARRA
06/01/2017	IBÁÑEZ	CHAPARRO	ADRIANA		PARRA
06/01/2017	DIAZ	PINZON	MIGUEL	ANGEL	PARRA

<i>FECHA</i>	<i>PRIMER APELLIDO DEL USUARIO</i>	<i>SEGUNDO APELLIDO DEL USUARIO</i>	<i>PRIMER NOMBRE DEL USUARIO</i>	<i>SEGUNDO NOMBRE DEL USUARIO</i>	<i>CIRUJANO</i>
02/01/2017	FRANCO	OSÉS	PEDRO	CONSTANTINO	CUERVO
06/01/2017	CARVAJAL	OSORIO	JULIANA	SILVIA	PARRA
06/01/2017	SAAVEDRA	RODRIGUEZ	WILSON		PARRA
06/01/2017	LANDAZABAL	PINTO	KIMBERLY	VANESSA	PARRA
06/01/2017	RIOS	AMADO	ARELIS	JUDITH	PARRA
06/01/2017	ESPARRAGOS	ZARATE	VIVIANA	FARLEY	ORTIZ
<i>07/01/2016</i>	<i>PAEZ</i>		<i>EDSON</i>		<i>PARRA</i>
07/01/2017	PEREIRA		ANDRES		PARRA
07/01/2017	BELTRAN		WUILVER	CAMILO	HOLMAN
07/01/2017	VANDERA		JUAN	DAVIS	PARRA
07/01/2017	DIAZ		CELIA		PARRA
07/01/2017	CELIS		LUIS	ALBERTO	FREIRE

Nota: Adaptada de Serviclínicos Dromédica S.A.

Según los datos y parámetros obtenidos del funcionamiento del servicio de cirugía en la IPS Serviclínicos Dromédica S.A., la programación arrojada por el modelo planteado es la siguiente:

Tabla 54.

Programación obtenida del modelo para el servicio de cirugía en la IPS Serviclínicos

Dromédica S.A

DIA DE LA PROGRAMACION	PACIENTES ASIGNADOS	DIA DE LA PROGRAMACION	PACIENTES ASIGNADOS
Enero 2/2017	Pedro Franco	Enero 3/2017	Rafael González
	Octavio Pinzón		Luddy Martínez
	Miguel Schiller		Antonio Peña
	Jesús Amaya		William Villafañe
	Nicolás Moreno		María Téllez
	Julián Caballero		Mario Laya
	Fabián Barrera		Shirley Ríos
	Betty Díaz		Miguel Díaz
	María Miranda		Wilson Saavedra
	Leidy Delgado		Andrés Pereira
	Edinson Parada	Juan Vandera	
	Liliana Duque	Juan Gutiérrez	
	Daisy González	Marlene Torres	
	Elvia Morales	Adriana Ibáñez	
	Claudia Rueda	Arelis Ríos	
	Beatriz Calderón	Celia Díaz	
	Mauricio García		
	Jhonatan Palomino	Enero 5/2017	----
	Yuli Espinosa		
	Yolima Forero		
Rafael González			
Cesar Corredor	Enero 6/2017	----	
Bray Briceño			
Juliana Carvajal			
Kimberly Landazábal	Enero 7/2017	----	
Viviana Espárragos			
Edson Páez			
Wuilver Beltrán	Enero 8/2017	----	
Luis Celis			

La satisfacción total de los pacientes obtenida es: $Z=38.733$

Como se puede observar en los resultados arrojados por el modelo y la programación realizada por la clínica, la asignación de pacientes se da en los 3 primeros días del periodo de planeación lo que muestra que en la semana se podría haber programado una mayor cantidad de usuarios y aprovechar de una mejor manera la capacidad instalada en el servicio. Además de esto se mejora significativamente la oportunidad del servicio puesto que se priorizan de una mejor manera los pacientes teniendo en cuenta el deadline y con esta nueva programación se logran disminuir los días de atención de los pacientes con respecto a la programación realizada por la IPS.

Después de obtenidos los pacientes que deben operarse en cada uno de los días del periodo de planeación, se procede a realizar la secuenciación, es decir, en qué orden serán operados los pacientes. Esto se realiza por medio del modelo planteado propuesto para la fase 2.

Fase 2:

- **Número de pacientes en la lista de espera:** Se obtiene de la programación realizada en la fase 1.
- **Número de salas pertenecientes a cada categoría:** 4 salas de cirugía
- **Número de camas de recuperación:** 7 camas de recuperación

Tabla 55.

Tiempo de preparación y anestesia, duración de la cirugía, duración de la recuperación (pos-anestesia)

	PACIENTE	CIRUJANO	DURACION DE LA CIRUGIA	PREPARACION Y ANESTESIA	DURACION DE LA CIRUGIA	POS ANESTESIA
1	Pedro Franco	CUERVO	1 HORA	15 minutos	45 minutos	1 Hora
2	Octavio Pinzon	CUERVO	1 HORA	15 minutos	45 minutos	1 Hora
3	Miguel Schiller	CUERVO	2 HORAS	20 minutos	1 hora 40 min	1 hora 30 min
4	Jesus Amaya	RAMIREZ	1 HORA 15 MIN	15 minutos	1 hora	1 hora
5	Nicolas Moreno	SORZANO	1 HORA	10 minutos	50 minutos	1 hora
6	Julian Caballero	PARRA	1 HORA	10 minutos	50 minutos	1 hora
7	Fabian Barrera	ORTIZ	1 HORA	15 minutos	45 minutos	2 horas
8	Betty Diaz	SANCHEZ	1 HORA	10 minutos	50 minutos	2 horas 30 min
9	Maria Miranda	SANCHEZ	1 HORA + 30 MIN	15 minutos	1 hora 15 min	3 horas
10	Leidy Delgado	PARRA	2 HORAS	20 minutos	1 hora 40 min	2 horas
11	Edinson Parada	PARRA	1 HORA	10 minutos	50 minutos	1 hora 30 min
12	Rafel Gonzalez	PARRA	2 HORAS 30 MIN	30 minutos	2 horas	3 horas
13	Liliana Duque	BARCO	1 HORA	10 minutos	50 minutos	2 horas
14	Daisy Gonzalez	ORTIZ	2 HORAS	15 minutos	1 hora 45 min	2 horas 30 min
15	Luddy Martinez	ORTIZ	2 HORAS 15 MIN	15 minutos	2 horas	3 horas 30 min
16	Elvia Morales	MENDIETA	2 HORAS	10 minutos	1 hora 50 min	1 hora 30 min
17	Claudia Rueda	ILEANA B.	1 HORA	10 minutos	50 minutos	1 hora
18	Beatriz Calderon	ILEANA B.	1 HORA	10 minutos	50 minutos	1 hora
19	Mauricio Garcia	ILEANA B.	1 HORA	10 minutos	50 minutos	1 hora
20	Jhonatan Palomino	PARRA	2 HORAS 30 MIN	20 minutos	2 horas 10 min	2 horas
21	Antonio Peña	PARRA	1HORA 30 MINT	15 minutos	1 hora 15 min	2 horas
22	William Villafañe	PARRA	1 HORA	10 minutos	50 minutos	1 hora 30 min
23	Maria Tellez	PARRA	1 HORA	10 minutos	50 minutos	1 hora 30 min
24	Juan Gutierrez	PARRA	2 HORAS	15 minutos	1 hora 45 min	2 horas
25	Mario Laya	ORTIZ	2 HORAS	15 minutos	1 hora 45 min	2 horas

	PACIENTE	CIRUJANO	DURACION DE LA CIRUGIA	PREPARACION Y ANESTESIA	DURACION DE LA CIRUGIA	POS ANESTESIA
26	Yuli Espinosa	BARCO	2 HORAS	20 minutos	1 hora 40 min	3 horas
27	Yolima Forero	MENDEIETA	30 MTOS	5 minutos	25 minutos	1 hora
28	Rafael Gonzalez	SANCHEZ	2 HORAS	15 minutos	1 hora 45 min	1 hora 30 min
29	Cesar Corredor	SANCHEZ	1 HORA	10 minutos	50 minutos	1 hora
30	Bray Briceño	CUERVO	3 HORAS	30 minutos	2 horas 30 min	3 horas 30 min
31	Marlene Torres	PARRA	2 HORAS	15 minutos	1 hora 45 min	2 horas 30 min
32	Shirley Rios	PARRA	1 HORA	10 minutos	50 minutos	1 hora 30 min
33	Adriana Ibañez	PARRA	2 HORAS	20 minutos	1 hora 40 min	2 horas
34	Miguel Diaz	PARRA	1 HORA 30 MTOS	15 minutos	1 hora 15 min	1 hora 30 min
35	Juliana Carvajal	PARRA	1 HORA 30 MTOS	20 minutos	1 hora 10 min	1 hora 30 min
36	Wilson Saavedra	PARRA	1 HORA	10 minutos	50 minutos	1 hora 30 min
37	Kimberly Landazabal	PARRA	2 HORAS	20 minutos	1 hora 40 min	3 horas
38	Arelis Rios	PARRA	2 HORAS 30 MIN	30 minutos	2 horas	3 horas 30 min
39	Viviana Esparragos	ORTIZ	1 HORA	10 minutos	50 minutos	1 hora
40	Edson Paez	PARRA	2 HORAS	20 minutos	1 hora 40 min	3 horas
41	Andres Pereira	PARRA	1 HORA	15 minutos	45 minutos	1 hora
42	Wuilver Beltran	HOLMAN	3 HORAS	30 minutos	2 horas 30 min	4 horas
43	Juan Vandera	PARRA	1 HORA	15 minutos	45 minutos	1 hora 30 min
44	Celia Diaz	PARRA	3 HORAS	30 minutos	2 horas 30 min	3 horas
45	Luis Celis	FREIRE	3 HORAS	40 minutos	2 horas 20 min	4 horas

Nota: Adaptada de Serviclínicos Dromédica S.A.

- **Tiempo de limpieza de la sala:** 30 minutos
- **Hora de apertura de las salas de cirugía y camas de recuperación:** 7 am
- **Horas regulares de las salas de cirugía:** 20 horas diarias
- **Proporción costo por unidad entre una hora extra en la sala de cirugía y una**

hora regular: 1,4

- **Proporción de costo de la cama por hora entre la cama de recuperación y el costo de una hora regular en la sala de cirugía: 0,4**
- **Número muy grande: 9999**
- **Cantidad de horas extras máximas de las salas de cirugía: 3 horas**
- **Horas regulares de funcionamiento de las camas de recuperación: 20 horas diarias**

La secuenciación obtenida para cada uno de los días de la programación es la siguiente:

Enero 2/2017

Tabla 56.

Asignación de pacientes a la sala de cirugía

PACIENTES	SALA DE CIRUGIA			
	1	2	3	4
Pedro Franco			X	
Octavio Pinzón	X			
Miguel Schiller	X			
Jesús Amaya	X			
Nicolás Moreno	X			
Julián Caballero				X
Fabián Barrera	X			
Betty Díaz		X		
María Miranda			X	
Leidy Delgado				X
Edinson Parada		X		
Liliana Duque				X
Daisy González			X	
Elvia Morales	X			
Claudia Rueda			X	
Beatriz Calderón			X	
Mauricio García			X	

PACIENTES	SALA DE CIRUGIA			
	1	2	3	4
Jhonatan Palomino				X
Yuli Espinosa			X	
Yolima Forero			X	
Rafael González	X			
Cesar Corredor	X			
Bray Briceño		X		
Juliana Carvajal		X		
Kimberly Landazábal		X		
Viviana Espárragos			X	
Edson Páez		X		
Wuilver Beltrán				X
Luis Celis				X

Tabla 57.*Asignación de pacientes a la sala de recuperación*

PACIENTES	CAMA DE RECUPERACIÓN						
	1	2	3	4	5	6	7
Pedro Franco	X						
Octavio Pinzón		X					
Miguel Schiller							X
Jesús Amaya				X			
Nicolás Moreno							X
Julián Caballero	X						
Fabián Barrera	X						
Betty Díaz			X				
María Miranda						X	
Leidy Delgado					X		
Edinson Parada						X	
Liliana Duque							X
Daisy González					X		
Elvia Morales			X				

PACIENTES	CAMA DE RECUPERACIÓN						
	1	2	3	4	5	6	7
Claudia Rueda							X
Beatriz Calderón				X			
Mauricio García				X			
Jhonatan Palomino				X			
Yuli Espinosa		X					
Yolima Forero	X						
Rafael González	X						
Cesar Corredor			X				
Bray Briceño			X				
Juliana Carvajal			X				
Kimberly Landazábal							X
Viviana Espárragos		X					
Edson Páez				X			
Wuilver Beltrán						X	
Luis Celis	X						

Tabla 58.

Hora de inicio de la operación en la sala de cirugía

PACIENTE	HORA DE INICIO
Pedro Franco	7:00 am
Octavio Pinzón	3:40 pm
Miguel Schiller	7:40 am
Jesús Amaya	9:10 pm
Nicolás Moreno	12:40 m
Julián Caballero	9:30 pm
Fabián Barrera	2:10 pm
Betty Díaz	7:00 am
María Miranda	8:30 am
Leidy Delgado	10:30 am
Edinson Parada	8:40 pm

PACIENTE	HORA DE INICIO
Liliana Duque	7:30 pm
Daisy González	4:00 pm
Elvia Morales	10:10 am
Claudia Rueda	9:30 pm
Beatriz Calderón	1:00 pm
Mauricio García	2:30 pm
Jhonatan Palomino	4:30 pm
Yuli Espinosa	10:30 am
Yolima Forero	6:30 pm
Rafael González	6:40 pm
Cesar Corredor	5:10 pm
Bray Briceño	11:00 am
Juliana Carvajal	6:40 pm
Kimberly Landazábal	2:30 pm
Viviana Espárragos	7:30 pm
Edson Páez	8:30 am
Wuilver Beltrán	1:00 pm
Luis Celis	7:00 am

Tabla 59.

Hora de inicio de los pacientes en las camas de recuperación

PACIENTE	HORA DE INICIO
Pedro Franco	8:00 am
Octavio Pinzón	4:40 pm
Miguel Schiller	9:40 am
Jesús Amaya	10:25 pm
Nicolás Moreno	1:40 pm
Julián Caballero	10:30 pm
Fabián Barrera	3:10 pm
Betty Díaz	8:00 am
María Miranda	10:00 am
Leidy Delgado	12:30 pm

PACIENTE	HORA DE INICIO
Edinson Parada	9:40 pm
Liliana Duque	8:30 pm
Daisy González	6:00 pm
Elvia Morales	12:10 pm
Claudia Rueda	10:30 pm
Beatriz Calderón	2:00 pm
Mauricio García	3:30 pm
Jhonatan Palomino	7:00 pm
Yuli Espinosa	12:30 pm
Yolima Forero	7:00 pm
Rafael González	8:40 pm
Cesar Corredor	6:10 pm
Bray Briceño	2:00 pm
Juliana Carvajal	8:10 pm
Kimberly Landazábal	4:30 pm
Viviana Espárragos	8:30 pm
Edson Páez	10:30 am
Wuilver Beltrán	4:00 pm
Luis Celis	10:00 am

- **Costo total:** \$ 31.956.000

Enero 3/2017

Tabla 60.

Asignación de pacientes a la sala de cirugía

PACIENTES	SALA DE CIRUGIA			
	1	2	3	4
Rafael González			X	
Luddy Martínez	X			
Antonio Peña		X		
William Villafañe				X

PACIENTES	SALA DE CIRUGIA			
	1	2	3	4
María Téllez				X
Mario Laya				X
Shirley Ríos		X		
Miguel Díaz	X			
Wilson Saavedra			X	
Andrés Pereira				X
Juan Vandera				X

Tabla 61.

Asignación de pacientes a la cama de recuperación

PACIENTES	CAMA DE RECUPERACIÓN						
	1	2	3	4	5	6	7
Rafael González	X						
Luddy Martínez	X						
Antonio Peña							X
William Villafañe	X						
María Téllez		X					
Mario Laya						X	
Shirley Ríos		X					
Miguel Díaz						X	
Wilson Saavedra							X
Andrés Pereira							X
Juan Vandera				X			

Tabla 62.*Hora de inicio de la operación en la sala de cirugía*

PACIENTE	HORA DE INICIO
Rafael González	7:30 am
Luddy Martínez	11:30 am
Antonio Peña	12:10 pm
William Villafañe	7:00 am
María Téllez	1:30 pm
Mario Laya	8:30 am
Shirley Ríos	9:50 am
Miguel Díaz	2:15 pm
Wilson Saavedra	10:40 am
Andrés Pereira	3:30 pm
Juan Vandera	11:25 am

Tabla 63.*Hora de inicio de los pacientes en las camas de recuperación*

PACIENTE	HORA DE INICIO
Rafael González	10:00 am
Luddy Martínez	1:45 pm
Antonio Peña	1:40 pm
William Villafañe	8:00 am
María Téllez	2:30 pm
Mario Laya	10:30 am
Shirley Ríos	10:50 am
Miguel Díaz	3:45 pm
Wilson Saavedra	11:40 am
Andrés Pereira	4:30 pm
Juan Vandera	12:25 pm

- **Costo total:** \$ 27.343.000

Enero 4/2017

Tabla 64.

Asignación de pacientes a las salas de cirugía

PACIENTES	SALA DE CIRUGIA			
	1	2	3	4
Juan Gutiérrez				X
Marlene Torres			X	
Adriana Ibáñez	X			
Arelis Ríos				X
Celia Díaz	X			

Tabla 65.

Asignación de pacientes a las camas de recuperación

PACIENTES	CAMA DE RECUPERACIÓN						
	1	2	3	4	5	6	7
Juan Gutiérrez		X					
Marlene Torres		X					
Adriana Ibáñez				X			
Arelis Ríos	X						
Celia Díaz						X	

Tabla 66.*Hora de inicio de la operación en la sala de cirugía*

PACIENTE	HORA DE INICIO
Juan Gutiérrez	7:00 am
Marlene Torres	11:15 am
Adriana Ibáñez	2:55 pm
Arelis Ríos	12:45 pm
Celia Díaz	8:30 am

Tabla 67.*Hora de inicio de los pacientes en las camas de recuperación*

PACIENTE	HORA DE INICIO
Juan Gutiérrez	9:00 am
Marlene Torres	1:15 pm
Adriana Ibáñez	4:55 pm
Arelis Ríos	3:15 pm
Celia Díaz	11:30 am

- **Costo total:** \$ 28.344.000

Dado que Serviclínicos Dromédica S.A. no cuenta con la información de los costos generados por la programación que fue realizada por la empresa, se hace imposible una comparación entre los costos obtenidos con la programación generada mediante el modelo desarrollado en el trabajo y los costos de la programación de la IPS. Por lo cual se crea un indicador con el que se pretende comparar las dos programaciones teniendo en cuenta la

utilización de la disponibilidad instalada en el servicio, midiendo así que tan efectiva está siendo el modelo propuesto.

- **Total de horas disponibles de las salas de cirugía**

Disponibilidad por sala = 20 horas diarias

Cantidad de salas = 4 salas

Disponibilidad total = 80 horas diarias

Enero 2/2017

- **Programación realizada por la clínica**

Pacientes programados = 2 pacientes

Horas programadas = 2 horas 30 minutos

Porcentaje de utilización = $(2,5 \text{ horas} / 80 \text{ horas}) * 100 = 3,125\%$

- **Programación obtenida por el modelo**

Pacientes programados = 29 pacientes

Horas programadas = 45 horas 15 minutos

Porcentaje de utilización = $(45,25 \text{ horas} / 80 \text{ horas}) * 100 = 56,562 \%$

Enero 3/2017

- **Programación realizada por la clínica**

Pacientes programados = 5 pacientes

Horas programadas = 8 horas 30 minutos

Porcentaje de utilización = $(8,5 \text{ horas} / 80 \text{ horas}) * 100 = 10,625 \%$

- **Programación obtenida por el modelo**

Pacientes programados = 11 pacientes

Horas programadas = 15 horas 45 minutos

Porcentaje de utilización = $(15,75 \text{ horas}/80 \text{ horas}) * 100 = 19,687 \%$

Enero 4/2017

- **Programación realizada por la clínica**

Pacientes programados = 10 pacientes

Horas programadas = 15 horas 15 minutos

Porcentaje de utilización = $(15,25 \text{ horas}/80 \text{ horas}) * 100 = 19,062 \%$

- **Programación obtenida por el modelo**

Pacientes programados = 5 pacientes

Horas programadas = 11 horas 30 minutos

Porcentaje de utilización = $(11,5 \text{ horas}/80 \text{ horas}) * 100 = 14,375 \%$

Se compararon los 3 primeros días de la programación puesto que el modelo programa la cantidad de pacientes en espera únicamente en esos días del periodo de planeación.

Se puede confirmar lo planteado anteriormente en cuanto al mal aprovechamiento de los recursos disponibles por la empresa, pues se evidencia que mediante la programación dada por el modelo se aumenta significativamente el porcentaje de utilización de las salas diariamente, a excepción del día 4 de Enero puesto que el modelo programó la mayor cantidad de pacientes en

los dos primeros días del periodo de planeación por lo que en este día solo se programaron los pacientes restantes que eran 5, haciendo que el porcentaje de utilización sea inferior.

Esto puede ser mejorado, con la ayuda del modelo matemático y del software como herramienta, como se evidencia en el desarrollo del presente trabajo. La implementación de herramientas informáticas y matemáticas, pueden generar una mejor programación, lo cual beneficiaría a la empresa en cuanto al aprovechamiento de los recursos disponibles, en la disminución de costos de funcionamiento, en la maximización de utilidades puesto que es posible atender un mayor número de pacientes en el periodo de planeación, al igual que a los pacientes pues se estaría brindando un servicio más oportuno al responder de manera más rápida a las necesidades de cada uno.

Se debe tener en cuenta que en el modelo se supuso que no se atienden pacientes de urgencia, lo cual en el funcionamiento real de las clínicas genera retrasos en las programaciones pues deben ser atendidos antes que los pacientes programados. Además de esto, existen otros factores que pueden afectar directamente los tiempos asignados y llegar a generar cancelaciones de cirugías como lo son las complicaciones de salud presentadas el día de la cirugía, el no contar con los elementos necesarios en el momento de la realización de la cirugía como en el caso de pacientes de ortopedia que necesitan implantes óseos, entre otros muchos factores.

9. Artículo Publicable

En este capítulo, se reescribió en forma de artículo la metodología usada para la realización del proyecto, la formulación y modelación del problema abordado y los datos

obtenidos a partir de la solución desarrollada con las herramientas mencionadas en los capítulos anteriores (Ver Apéndice C).

10. Conclusiones y Recomendaciones

En la fase uno del modelo, se logra observar que al aumentar el número de pacientes, crecen significativamente las variables, lo que hace que el problema se vuelva más robusto y abarque mayor número de días disponibles para la programación.

En la función objetivo de la segunda fase, mediante los parámetros de penalización, se determina su valor convirtiendo todos los datos en función de los costos de las horas regulares de las salas de cirugía y para obtener el valor del costo total de la programación se multiplica por el costo asignado a una hora regular de las salas.

Con los datos obtenidos en el desarrollo de la fase uno se puede observar que se realiza una mejora en la programación, aumentado el aprovechamiento de la capacidad instalada en la institución, lo que permite atender una mayor cantidad de pacientes y aumentar la oportunidad en la atención requerida.

Debido a que la empresa Serviclínicos Dromédica S.A. no cuenta con la información de los costos generados por la programación que se realizó en la empresa, se hace imposible realizar la comparación con los costos obtenidos mediante el modelo. Se asume que los costos en algunos días de la programación puedan ser más elevados que los causados por la programación de la empresa, pero esto puede deberse a un mayor número de pacientes programados por el modelo en ciertos días del periodo de planeación

Se recomienda probar el modelo con una institución de mayor capacidad en cuanto a cantidad de pacientes atendidos, salas de cirugía, camas de recuperación y cirujanos, para comprobar el funcionamiento con instancias mayores.

Referencias Bibliográficas

- Aarts, E., & Korst, J. (2012-2013). *Simulated Annealing: Un algoritmo estocástico de búsqueda local*. Nueva York: John Wiley and Sons Inc. Obtenido de <https://www.cs.upc.edu/~mabad/IA/SIMULATED%20ANNEALING.pdf>
- Baesler, F., Gatica, J., & Correa, R. (2015). *Simulation optimization for operating room scheduling*. En: *International Journal of Simulation Modelling*. Vol. 14, no. 2, p 215-226.
- Banditori, C., & Cappanera, P. y. (2013). *A combined optimization–simulation approach to the master surgical scheduling problem*. *Journal of Management Mathematics*. Vol. 24, no. 2, p 155-187.
- Blake, J., Dexter, F., & Donald, J. (2002). *Operating Room Managers Use of Integer Programming for Assigning Block Time to Surgical Groups: A Case Study*. *Anesthesia & Analgesia*. Vol. 94, no 1, p. 143-148.
- Chow, V., Puterman, M., Salehirad, N., Huang, W., & Atkins, D. (2011). *Reducing Surgical Ward Congestion Through Improved Surgical Scheduling and Uncapacitated Simulation*. *Productions and Operations Management*. Vol. 20, no. 3, pp 418-430.
- Denton, B., Miller, A., Balasubramanian, H., & Huschka, T. (2010). *Optimal Allocation of Surgery Blocks to Operating Rooms under Uncertainty*. *Operations research*. Vol. 58, no. 4, p 802-816.
- Di Martinelly, C., Baptiste, P., & Maknoon, M. (2014). *Una evaluación de la integración de los cambios horarios de la enfermera con la planificación y programación de la sala de operaciones*. *Revista Internacional de Investigación de Producción*. Vol. 52, no 24, p. 7239-7250.

- Dowland, K., & Díaz, B. (2003). *Heuristic design and fundamentals of the Simulated Annealing*. Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial. Vol. 7, No.19, p 93- 102.
- Duma, D., & Aringhieri, R. (2015). *An online optimization approach for the Real Time Management of operating rooms*. Operations Research for Health Care. Vol. 7, no, p 40-51.
- Esquivel, L. L. (2014). *Modelo matemático para la programación de un horario escolar con multi-localización de docentes*. Santiago de Cali: Universidad del Valle. Trabajo de grado maestría en ingeniería industrial.
- Franco Baquero, J. F., Toro Ocampo, E., & Gallego Rendón, R. (2008). *Problema de asignación óptima de salones resuelto con búsqueda Tabú*. Ingeniería & Desarrollo. Vol. 24 p. 149-175.
- Glouberman, S., & Mintzberg, H. (1996). *Managing the care of health and the cure of disease - Part I: Differentiation*. Revisión de la gestión de la atención médica. Vol. 26, no 1, p. 56-69.
- Holte, M. (2013). *The implementor/adversary algorithm for the cyclic and robust scheduling problem in health-care*. European Journal of Operational Research. Vol. 226, no. 3, pp 551-559.
- Hosseini, N., & Taaffe, K. M. (2014). *Allocating Operating Room Block Time Using Historical Caseload Variability*. Health Care Management Science. Vol. 18, no. 4, pp 419-430.
- Kacem, I., Laroche, P., & Roka, Z. (2014). *International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*. France, LCOMS, Metz: Proceedings: Université de Lorraine. IEEE.

- Lahoz, M., & Lahoz, D. (02 de Julio de 2009). *Programación Lineal Entera*. Obtenido de Universidad de Zaragoza: <https://ocw.unizar.es/ocw/enseanzas-tecnicas/modelos-de-investigacion-operativa/ficheros/OCWProgEntera.pdf>
- M'hallah, R., & Al-Roomi, A. H. (2014). *The planning and scheduling of operating rooms: A simulation approach*. Computers and Industrial Engineering. Vol. 78, no, p 235-248.
- Mejía Caballero, J., & Paternina, C. (Junio de 2010). *Asignación de horarios de clases universitarias mediante algoritmos evolutivos*. Revista Educación en Ingeniería. Vol. 5, no 9, p. 140-149.
- Niu, Q., Peng, Q., & Elmekawy, T. (2013). *Improvement in the operating room efficiency using Tabu search in simulation*. . Business Process Management Journal. Vol. 19, no. 5, p 799-818. .
- Olivera, A. (Agosto de 2004). *Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos*. Obtenido de Universidad de la República, Montevideo, Uruguay: <https://www.fing.edu.uy/inco/pedeciba/bibliote/reptec/TR0408.pdf>
- Pacheco Agüero, C. (2000). *Distribución óptima de horarios de clases utilizando la técnica de Algoritmos genéticos*. Acatlima: Universidad Tecnológica de la Mixteca.
- Pulido, R., Aguirre, A., Ortega-Mier, M., Garcia-Sanchez, A., & Mendez, C. (2014). *Managing daily surgery schedules in a teaching hospital: a mixed-integer optimization approach*. BMC Health Services Research. Vol. 14, no, pp 464.
- Ramos, S. (Noviembre de 2007). *Modelos y Optimización I: Heurísticas y Problemas Combinatorios*. Obtenido de Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería: <http://materias.fi.uba.ar/7114/Docs/ApunteHeurísticas.pdf>

- Roland, B., Di Martinelly, C., Riane, F., & Pochet, Y. (2010). *Scheduling an operating theatre under human resource constraints*. Computers and Industrial Engineering. Vol. 58, no. 2, p 212-220.
- Ruíz Gómez, F. (19 de Julio de 2012). *Los tres males del sistema de salud*. Recuperado el 12 de Noviembre de 2017, de Diario El Espectador: <https://www.elespectador.com/noticias/salud/los-tres-males-del-sistema-de-salud-articulo-361405>
- Saadouli, H., Jerbi, B., Dammak, A., Masmoudi, L., & Bouaziz, A. (2014). *A stochastic optimization and simulation approach for scheduling operating rooms and recovery beds in an orthopedic surgery department*. Computers & Industrial Engineering. Vol. 80, no, p 72-79.
- Salazar López, B. (12 de Agosto de 2016). *Programación Lineal*. Obtenido de Herramientas para el Ingeniero Industrial : <http://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/investigación-de-operaciones/programación-lineal/>
- Saremi, A., JULA, P., Elmekawy, T., & Wang, G. G. (2013). *Appointment Scheduling of Outpatient Surgical Services in a Multistage Operating Room Department*. International Journal of Production Economics. Vol. 141, no. 2, p 646-65.
- Silva, T., De Souza, M., Saldanha, R., & Burke, E. (2015). *Discrete Optimization: Surgical scheduling with simultaneous employment of specialised human resources*. European Journal of Operational Research. Vol. 245, no. 3, p 719-730.
- Téllez, E. (2007). *Uso de una colonia de hormigas para resolver problemas de programación de horarios*. . Xalapa: Laboratorio Nacional de Informática Avanzada. Trabajo de grado maestría en ciencias de la computación.

- Van Esse, J. T., Hurink, J. L., Hartholt, W., & Van Den Akker, B. J. (2012). *Decision Support System for the Operating Room Rescheduling Problem*. . Health Care Management Science. Vol. 15, no. 4, pp 355-372.
- Wang, Y., Tang, J., & Fung, R. (2014). *A Column-Generation-Based Heuristic Algorithm for Solving Operating Theater Planning Problem under Stochastic Demand and Surgery Cancellation Risk*. International Journal of Production Economics. Vol. 158 np, p. 28-36.
- Xiao, G., Van Jaarsveld, W., Dong, M., & Van de Klundert, J. (2016). *Stochastic programming analysis and solutions to schedule overcrowded operating rooms in China*. Computers and Operations Research. Vol. 74, no, p 78-91.
- Zabala, P. (Agosto de 2006). *Capítulo 2: Programación lineal entera*. Obtenido de Tesis Doctoral: http://digital.bl.fcen.uba.ar/download/tesis/tesis_n3987_Zabala.pdf
- Zhang, Z., XIE, X., & Geng, N. (2013). *Dynamic Surgery Assignment of Multiple Operating Rooms With Planned Surgeon Arrival Times*. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. Vol. 11, no. 3, p 680-691.
- Zhang, Z., Xie, X., & Geng, N. (2014). *Dynamic surgery assignment of multiple operating rooms with planned surgeon arrival times*. Taipei, Taiwan: IEEE transactions on automation science and engineering. Vol. 11, no 3, p. 680-691.

