

**MODELO MULTI OBJETIVO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA RENTABILIDAD
EN EL ÁREA DE CIRUGÍA DE LAS INSTITUCIONES PRESTADORAS
DE SERVICIOS DE SALUD EN COLOMBIA**

JUAN FERNANDO GUARÍN CASTRO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
BUCARAMANGA
2017**

**MODELO MULTI OBJETIVO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA RENTABILIDAD
EN EL ÁREA DE CIRUGÍA DE LAS INSTITUCIONES PRESTADORAS
DE SERVICIOS DE SALUD EN COLOMBIA**

JUAN FERNANDO GUARÍN CASTRO

**Tesis de grado presentada para optar al título de
MAGISTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**Director
CARLOS EDUARDO DÍAZ BOHÓRQUEZ
MSc. en Ingeniería Industrial**

**Grupo de Investigación:
OPTIMIZACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE SISTEMAS PRODUCTIVOS,
ADMINISTRATIVOS Y LOGÍSTICOS –OPALO-**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
BUCARAMANGA
2017**

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	12
1. REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	13
1.1 CÁLCULO DE LA RENTABILIDAD.....	14
1.2 CÁLCULO DE LA RENTABILIDAD EN LAS INSTITUCIONES PRESTADORAS DE SERVICIOS DE SALUD	15
1.3 MODELOS DE OPERACIONES APLICADOS EN LAS IPS.....	15
1.4 APLICACIONES PARA LA PROGRAMACIÓN DE SALAS DE CIRUGÍA ..	16
1.5 APLICACIONES RELATIVAS A LA UTILIZACIÓN DE MODELOS DONDE INTERVIENEN LOS COSTOS EN LAS SALAS DE CIRUGÍA.....	21
1.6 MODELOS MULTI OBJETIVO	22
1.6.1 El problema de la mochila multiobjetivo	24
1.6.2 Soluciones de optimización multiobjetivo y metaheurísticas para el área de cirugía	25
1.7 METODOLOGÍAS ADICIONALES PARA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS MULTI OBJETIVO.....	28
1.8 ENFOQUES ADICIONALES A LOS MODELOS OPERATIVOS EN EL SECTOR SALUD	29
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	31
2.1 PROBLEMÁTICA.....	31
2.2 ESQUEMA DE SOLUCIÓN	32
2.3 ESPECIFICACIONES DEL MODELO	33
2.3.1 Descripción de Objetos básicos usados en el modelo	33
2.3.1.1 Índices utilizados en el modelo.....	33
2.3.1.2 Parámetros.....	34
2.3.2 Formulación de Funciones	37
2.3.3 Función Objetivo	39
2.3.3.1 Índice Sintético Q como función objetivo	40
2.3.4 Restricciones.....	41
3. METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN PARA PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO POR MEDIO DE UN ALGORITMO GENÉTICO	42
3.1 ALGORITMOS GENÉTICOS.....	42
3.1.1 Enfoques de solución a problemas multiobjetivo por medio de algoritmos genéticos	43
3.2 OBJETOS BÁSICOS	44

3.2.1 Lista de EPS	44
3.2.2 Lista de Franjas	44
3.2.3 Lista de Quirófanos.....	44
3.2.4 Asociación de franjas a salas	45
3.2.5 Lista de Especialidades quirúrgicas	45
3.1.6 Lista de Cirujanos	46
3.1.7 Lista de Márgenes de negociación con EPS	46
3.1.8 Lista de Procedimientos	47
3.1.9 Lista de Pacientes en la lista de espera.....	47
3.3 ASPECTOS DETERMINANTES RELACIONADOS CON LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD ASISTENCIAL	48
3.4 CARACTERÍSTICAS DEL ALGORITMO GENÉTICO.....	51
3.4.1 Configuración de los elementos del Gen, y definición de la codificación de las variables de decisión	51
3.4.2 Configuración de la matriz de la población inicial	52
3.4.2.1 Definición de la estructura de la matriz:	52
3.4.2.2 Definición del modo como se conforma la matriz con el perfil de los organismos que ingresan:	53
3.4.2.3 Definición del modo en que se organiza y controla el llenado de la matriz evitando la duplicidad de pacientes en los organismos que ingresan a la matriz:	53
3.4.2.4 Generación de bloques quirúrgicos:.....	54
3.4.3 Descripción del proceso de recombinación o cruzamiento	55
3.4.4 Descripción del proceso de definición del punto de cruce.....	55
3.4.5 Descripción del proceso de Mutación	57
3.3.6Evaluación del Fitness, Estimación del Índice Sintético y criterio de Parada del algoritmo genético.....	57
3.4.6.1 Estimación del factor de afectación del rendimiento de quirófanos	57
3.5 DIAGRAMA DE FLUJO	59
4. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS OBTENIDOS.....	61
4.1 DISEÑO DEL EXPERIMENTO	61
4.2 DATOS DE ENTRADA Y RESULTADOS	61
4.3 INCIDENCIA DE LA VARIACIÓN DE LOS PESOS WU	66
CONCLUSIONES.....	68
BIBLIOGRAFÍA.....	69
ANEXOS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.8

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Analogía entre FJSP y el problema de planeación de salas	27
Tabla 2 Índices utilizados en el modelo.	33
Tabla 3 Parámetros utilizados en el modelo.	34
Tabla 4 Variables utilizadas en el modelo.	35
Tabla 5 Lista de EPS.....	44
Tabla 6 Lista de Franjas	44
Tabla 7 Lista de Quirófanos	45
Tabla 8 Matriz de Franjas y Salas	45
Tabla 9 Lista de Especialidades quirúrgicas.....	45
Tabla 10 Lista de Cirujanos.....	46
Tabla 11 Lista de Márgenes de negociación con EPS.....	47
Tabla 12 Lista de Procedimientos	47
Tabla 13 Lista de Pacientes en la lista de espera.....	48
Tabla 14 Estructura de las soluciones heurísticas para la población inicial	53
Tabla 15 Salida en formato Excel.csv correspondiente a la programación de salas para el primer día de operación	62
Tabla 16 Estimación de parámetros para la programación realizada por la clínica ese día.....	63
Tabla 17 Resumen de los valores del índice sintético para las programaciones obtenidas por el algoritmo y las ejecutadas pro la IPS para la cuatro semanas	65
Tabla 18 Resultado Prueba de Hipótesis	66
Tabla 19 Incidencia de la variación de los pesos Wu	67

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 Representación ítems y usuarios sobre la línea de la variable no observable.....	49
FIGURA 2 Modelo Logit.....	51
FIGURA 3 Estructura del Cromosoma.....	51
FIGURA 4 Algoritmo de llenado de los genes.....	54
FIGURA 5 Estructura de la población inicial	54
FIGURA 6 Generación de bloques quirúrgicos	55
FIGURA 7 Definición del punto de cruce	56
FIGURA 8 Diagrama de Flujo Algoritmo	60

LISTA DE ANEXOS

Los siguientes documentos anexos se encuentran en la carpeta adjunta en el CD

ANEXO A: USO DE LA FUNCIÓN LOGIT PARA EL CÁLCULO DE PUNTAJES EN LA PRIORIZACIÓN DE PACIENTES

ANEXO B. CÓDIGO PROGRAMADO EN MATLAB DEL ALGORITMO GENÉTICO

ANEXO C. ESQUEMA DE VALORACION DE ITEMS PARA LA CONFIGURACION DE LAS HABILIDADES DE LAS IPS, Y LAS COMPLEJIDADES DE LOS PROCEDIMIENTOS ASOCIADOS A LOS PACIENTES EN LISTA DE ESPERA.

RESUMEN

TÍTULO: MODELO MULTI OBJETIVO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA RENTABILIDAD EN EL ÁREA DE CIRUGÍA DE LAS INSTITUCIONES PRESTADORAS DE SERVICIOS DE SALUD EN COLOMBIA¹

AUTOR: JUAN FERNANDO GUARÍN CASTRO²

PALABRAS CLAVE: Optimización Multiobjetivo, Rentabilidad de salas de cirugía, Algoritmos Genéticos, Priorización de pacientes.

CONTENIDO

En esta investigación se desarrolló un modelo para optimizar la rentabilidad del área de cirugía de las Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud en Colombia a partir de un índice sintético, que equilibra los beneficios financieros y asistenciales para usuarios en listas de espera con una manera óptima de organizarlos en bloques quirúrgicos.

La interacción entre el algoritmo genético multiobjetivo y el uso de una regla básica de secuenciación, generó una forma de programación de salas de cirugía que maximizó el beneficio financiero y el asistencial, y aprovechó al máximo la disponibilidad de salas.

Para el problema multiobjetivo, se utilizó un algoritmo genético MOGA³ basado en el problema de la mochila. Cada sala representa una mochila con su respectiva capacidad en tiempo, para la cual se espera maximizar un beneficio que se formuló en función de los objetivos financiero y asistencial para los procedimientos que allí se realicen. El primero, estimado por medio de la rentabilidad por procedimiento, y el segundo bajo un esquema de priorización de pacientes estimado a través de un índice de calidad asistencial (usando una función Logit).

Para la secuenciación, se agruparon los procedimientos por bloques quirúrgicos para asignarlos a las salas con base en la regla de secuenciación de “menor desviación estándar por procedimiento”.

Con los tiempos, desviaciones, y la capacidad de las salas, se estableció una estimación de la probabilidad de cumplimiento, para penalizar la utilidad con base en el rendimiento de los bloques.

Para la validación, se simuló escenarios en Matlab utilizando la información de una IPS para comparar las programaciones propuestas por el modelo. Los resultados obtenidos por el modelo mostraron mejoras significativas en el desempeño del índice sintético, respecto de las programaciones realizadas, lo cual corrobora la utilidad del método de optimización.

¹ Tesis de Maestría

² Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: MSc Carlos Eduardo Díaz Bohórquez.

³ MOGA: Multi-objective Optimization Genetic Algorithm

ABSTRACT

TITLE: A MULTIOBJECTIVE MODEL TO OPTIMIZE THE PROFITABILITY IN THE AREA OF SURGERY IN THE HEALTH SERVICE INSTITUTIONS IN COLOMBIA ⁴

AUTHOR: JUAN FERNANDO GUARIN CASTRO⁵

KEYWORDS: Optimización Multiobjetivo, Rentabilidad de salas de cirugía, Algoritmos Genéticos, Priorización de pacientes.

DESCRIPTION:

In this research, a model was developed to optimize the profitability of the surgery area of institutions providing health services in Colombia, from a synthetic index that reaches the balance of financial and welfare benefits for users in waiting lists, and organize them in surgery blocks.

The interaction between the multi-objective genetic algorithm and a basic rule of sequencing, it was possible to generate a form of programming for the operating rooms that maximized the financial and welfare benefits, and the availability of these rooms.

To the multi-objective problem, a MOGA genetic algorithm was used based on the knapsack problem. Each operating room represents a knapsack with their respective capacity time, for which is expected to maximize a profit that was formulated based on the financial and healthcare objectives for procedures performed there. The first, estimated across the profitability of the procedure, and the second under a scheme of prioritization of patients estimated through an index of quality of care (by use of Logit function).

In the sequencing scheme, the procedures was grouping in surgical blocks to allocate them to the operation rooms based on the secuention rule of "the slightest standard deviation per procedure".

With the times, deviations, and available time allocated to the different rooms, an estimate of the likelihood of compliance was established for penalizing the utility based on the performance of the blocks.

For validation, Matlab simulations were performed, and various scenarios of actual programming from an institution that provides health services vs schedules proposed by the model were compared. The results obtained in the procedure runs showed significant improvements to performance of the synthetic index, respect to the regarding schedules were made by IPS, which corroborates the usefulness of the optimization method.

⁴ MSc Thesis

⁵ Faculty of Physicomechanical Engineering. School of industrial and bussiness studies. Director: MSc Carlos Eduardo Díaz Bohórquez.

INTRODUCCIÓN

A raíz de la Ley 100⁶, en Colombia los modelos de atención para los usuarios de los servicios de salud experimentaron grandes cambios enmarcados por la política de seguridad social emanada de la carta magna de 1991 (artículo 49), donde se estableció que la atención en salud para los usuarios debe tener el carácter de servicio público de obligatorio cumplimiento y que el Estado debe ejercer su dirección y control.

Partiendo de este hecho, las instituciones prestadoras de servicios de salud (IPS), han tenido que desarrollar sus operaciones buscando el equilibrio entre el resultado que se puede lograr para el beneficio del usuario en el cuidado de su salud y lo que el sistema de salud puede gestionar manteniendo un margen de rentabilidad favorable. En efecto, la salud se convierte en un “negocio viable” cuando las IPS mantienen la rentabilidad y los usuarios obtienen un nivel satisfactorio de calidad en la prestación del servicio.

Habida cuenta de lo anterior, en este trabajo de investigación se plantea un modelo efectivo de lograr ese balance para el área de cirugía utilizando un algoritmo genético multiobjetivo para la optimización de la utilidad financiera y la asistencial, que permite conocer la secuencia en la que se deben llevar a cabo los procedimientos quirúrgicos provenientes de las listas de espera, organizados por bloques quirúrgicos en las respectivas salas, considerando los cupos para las urgencias.

La solución proporciona la cantidad y secuencia de procedimientos para las salas de cirugía, para lograr una maximización del beneficio conjunto IPS-Paciente, con el máximo uso posible de las salas.

En el capítulo siguiente se presenta la revisión de la literatura que se realizó para establecer el marco del problema, en el capítulo 2 se define el modelo para la resolución del problema de optimización de la rentabilidad a partir de las utilidades financieras con el mejor balance de calidad asistencial y uso de las salas, en el capítulo 3 se muestra la optimización realizada para el modelo a través de un algoritmo genético, y los aspectos determinantes relacionados con el modelo para la medición de la calidad asistencial en forma cuantitativa. En el capítulo 4 se describen los resultados obtenidos, posteriormente en el capítulo 5 se encuentran las conclusiones y propuestas para futuras investigaciones, y finalmente se detalla la bibliografía.

⁶ CONGRESO DE COLOMBIA. Ley 100 de 1993. 189 p.

1. REVISIÓN DE LA LITERATURA

La revisión de la literatura que enmarca este trabajo de investigación orienta su atención a los artículos con referencia a la optimización de modelos operacionales resueltos mediante el uso de técnicas metaheurísticas dada su alta capacidad para generar soluciones eficientes ante problemas complejos, y que estuvieran configurados para que esas soluciones satisficieran un modelo multiobjetivo.

La revisión se orientó teniendo en cuenta la afinidad entre el objetivo de la investigación y el conjunto de los siguientes criterios de inclusión: *Multiobjective Optimization, Knapsack Problem, Knapsack Scheduling Problem, Job Shop Scheduling Problem, Operating Rooms Planning-scheduling, Master Surgery Scheduling, Health Care Optimization, Profit Optimization, Metaheuristics, DuPont Analysis, Efficient Measure, Productivity Measure, Mathematical Programming, Synthetic Index, Lexicographic Optimization, Bilevel Optimization*, con su respectiva analogía para idioma español.

La organización de la revisión establece una primera parte que describe algunas referencias básicas sobre conceptos y definiciones fundamentales para contextualizar el significado de la rentabilidad y posteriormente se presenta una clasificación de los principales modelos y metodologías que se encontraron con base en los criterios de selección.

La estructura general de la revisión se detalla a continuación:

- Cálculo de la Rentabilidad
- Cálculo de la Rentabilidad en las Instituciones prestadoras de servicios de salud
- Modelos de operaciones utilizados en las IPS
- Aplicaciones para la programación de salas de cirugía
- Aplicaciones relativas a la utilización de modelos donde intervienen los costos (o los beneficios) en las salas de cirugía
- Modelos Multiobjetivo
 - Modelos Multiobjetivo en el área de la salud
 - El problema de la mochila como Multiobjetivo
 - Soluciones de optimización multiobjetivo utilizando metaheurísticas aplicadas a las IPS
- Enfoques adicionales a los modelos operativos en el sector salud

1.1 CÁLCULO DE LA RENTABILIDAD

A través de los años, se ha aceptado la premisa que el objetivo principal de las empresas es la obtención de utilidades⁷, y se han diseñado múltiples herramientas que sirven de instrumento para medir los resultados de la gestión de la gerencia en el logro de ese objetivo y para brindar información a los involucrados en la toma de decisiones⁸. El resultado del cálculo de la utilidad para cualquier empresa o proyecto se puede expresar de manera sencilla en unidades monetarias como la diferencia entre un ingreso y un egreso, pero este indicador, aparte de elemental, resulta insuficiente para la medición del desempeño integral de la empresa, pues no tiene en cuenta la cantidad de recursos que se necesitan para obtener esa utilidad⁹. Resulta entonces fundamental comparar esa utilidad respecto de un aporte de fondos y que esa relación se exprese formalmente por medio de una función¹⁰. Surge entonces un indicador de la rentabilidad expresado como la relación entre la utilidad y la inversión realizada.

Ahora bien, a pesar de que las unidades monetarias expresan una magnitud que corresponde al resultado de haber cuantificado la realización de una serie de operaciones con base en algún criterio, no dicen mucho sobre si la forma de haber realizado dichas operaciones hubiese podido mejorar el valor asociado a la rentabilidad, de forma tal que hiciera posible el establecimiento de una relación de causalidad entre la rentabilidad obtenida y la calidad de la gestión de las operaciones.

El Método Dupont, desarrollado por la empresa del mismo nombre, conjuga los conceptos contables entre el balance y el estado de resultados para brindar una perspectiva más completa para el cálculo de la rentabilidad¹¹, de esta manera, la rentabilidad es expresada como el producto de la Eficiencia por la Productividad. La Eficiencia como medida de rendimiento de las utilidades respecto de los ingresos, y la productividad como medida de la capacidad de generación de ingresos por medio del uso de los activos. Valiéndose de esa fortaleza, la presente investigación retoma esas perspectivas asociándolas con funciones medibles operacionalmente.

⁷ SALLENAVE, Jean Paul. La gerencia Integral. Bogotá: Norma, 1995, p. 62

⁸ *Ibíd.*

⁹ *Ibíd.*

¹⁰ *Ibíd.*, p. 63.

¹¹ LÓPEZ MONTALEZA, Ginger. Método Dupont. En: Universidad Politécnica Salesiana. p. 5

1.2 CÁLCULO DE LA RENTABILIDAD EN LAS INSTITUCIONES PRESTADORAS DE SERVICIOS DE SALUD

En Colombia se han llevado a cabo investigaciones relacionadas con tópicos asociados a la optimización en el campo hospitalario con el objetivo de incorporar para el sector salud una forma que permita tener una visión más clara sobre la dinámica operacional hospitalaria, sin embargo, sus resultados no están enfocados a la medición económica. La necesidad de un acercamiento a las metodologías de costeo en el sector salud es evidente, y existe una necesidad latente debido a que en el sector salud las decisiones tienden a ser controversiales.

Mejía (2008)¹² realiza una profunda valoración de estos aspectos relacionados con la evaluación económica de la salud. En su investigación sobre los modelos costo efectividad y costo utilidad, se observan las conclusiones especialmente enfocadas a discutir las barreras para la implementación, encontradas en un grupo de IPS con diferencias en los contextos de sus modelos de atención.

1.3 MODELOS DE OPERACIONES APLICADOS EN LAS IPS

Con el propósito de tener presentes las características fundamentales de la prestación de servicios en salud, claves para el diseño y configuración de restricciones en el modelo de optimización, se relaciona a continuación un referente bibliográfico sobre el cual se fundamentan y construyen los modelos de operación en salud, y en donde se describe de forma detallada los principios y las mejores técnicas para el diseño, administración y optimización de las operaciones para el área de salud: a) Handbook of hospitality operations and IT- de Jones, Pizam¹³, b) Quantitative Methods in Health care management Techniques and applications- de Ozcan¹⁴, c) Decision analysis for health care managers- de Alemi Farrok et al¹⁵, d) Healthcare finance de Gapenski¹⁶, e) Introduction to Hospitality Operations- de

¹² MEJÍA MEJÍA, Aurelio. Evaluación económica de programas y servicios de salud. En: Rev. Gerencia, Política y Salud. Vol. 7 No. 15, 2008. pp. 91-113

¹³ JONES, Pizam. Handbook of Hospitality operations and IT. En: El Sevier, 2008. pp. 269-294

¹⁴ OZCAN, Yasar A. Quantitative methods in health care management: Techniques and applications. San Francisco, John Wiley & Sons, Inc. 2009. 467 p.

¹⁵ ALEMI, Farrokh y GUSTAFSON, David H. Decision Analysis for Healthcare managers. Chicago, Il., Health Administration Press, 2010. 369 p.

¹⁶ GAPENSKI, Louis C. Healthcare finance: An introduction to accounting and financial management. Chicago, Il. Foundation of the American College of Healthcare, 2008. 679 p.

Jones¹⁷, f) Financial management of health care organizations- de Zelman¹⁸ g) Operations research and healthcare handbook of methods and applications- de Brandeau sainfort et al¹⁹, h) Handbook of healthcare system scheduling- de hall²⁰, i) Health economics and financing- de Getzen²¹, j) Health economics- de Zweifel et al²², y k) Handbook of healthcare operations management- de Chan²³. Adicionalmente, en esta revisión de la literatura se tuvo en cuenta el aspecto sobre reglamentación de las prácticas operativas en las salas, como elemento de referencia para la construcción de restricciones.

En lo que se refiere a los trabajos relacionados con la gestión de las salas de cirugía, el trabajo de investigación realizado por Elizondo, Aguirregoitia²⁴, presenta un estado del arte sobre el desarrollo de dicha práctica.

1.4 APLICACIONES PARA LA PROGRAMACIÓN DE SALAS DE CIRUGÍA

La tarea de programación de cirugías juega un papel decisivo para que el uso de recursos y la atención se puedan optimizar y logren un incremento de la productividad. Se revisó la literatura relacionada con las aplicaciones de métodos cuantitativos y modelos para la planeación y programación de las salas de cirugía con el objeto de examinar la naturaleza de los problemas planteados, el enfoque para abordarlos, las metodologías utilizadas para resolverlos y las características principales de configuración de los modelos.

¹⁷ JONES, Peter. Introduction to hospitality operations. An indispensable guide to the industry. 2 ed. London, Cengage Learning EMEA, 2002. 317 p.

¹⁸ ZELMAN, William N., MCCUE, Michael J. Financial Management of Health Care Organizations: an introduction to fundamental tools concepts and applications. 2 ed. Malden, Blackwell Publishing, 2003. 538 pp.

¹⁹ BRANDEAU, Margaret L. et al., Operations Research and Health Care a Handbook of methods and applications. New York, Kluwer Academic Publishers, 2004. 882 p.

²⁰ HALL, Randolph. Handbook of Healthcare System Scheduling. New York, Springer Science+Business Media, 2012. 336 p.

²¹ GETZEN, Thomas E. Health Economics and Financing. 5 Ed. New Jersey, John Siley & Sons. 2013. 499 p.

²² ZWEIFEL, Peter. et al., Health Economics. Berlin, Springer-Verlag, 2009. 550 p.

²³ CHAN, Cw., y GREEN, Lv. Handbook of Healthcare Operations Management: Methods an Applications. New York, Springer Science+Business, 2013. 541 p

²⁴ ELIZONDO, Echenique y AGUIRREGOITIA, Díaz. Organización y gestión hospitalaria hoy: Servicio de cirugía. En: Osasunaz. Vol. 5, 2003 pp. 191-236

Se inició con el trabajo de investigación realizado en Colombia por Velásquez-Restrepo et al²⁵ en el que se encuentra una revisión de literatura sobre los enfoques metodológicos para realizar la planificación de salas de cirugía.

El trabajo inicia con la elaboración de una taxonomía con base en la clasificación de los problemas más comunes tratados en el área de cirugía, y el tipo de metodologías empleadas en la construcción de los modelos de solución. También se describen las variables y factores determinantes en el proceso de planificación de salas, y se elabora un perfil de las principales mejoras obtenidas a través del uso de estas técnicas.

A manera de resumen de las metodologías empleadas, esta revisión clasifica los modelos en cuatro grupos: Optimización uniobjetivo determinística con un 29,4% de los modelos, uniobjetivo estocástica con un 11,8%, multiobjetivo determinística con un 25,5% y multiobjetivo estocástica con un 33,3% respectivamente.

Como nota al margen, es importante destacar que dentro de los problemas tipo formulados por las investigaciones, el tópico sobre rentabilidad planteada desde la perspectiva de la presente investigación no se encuentra relacionado de forma directa.

En el trabajo de investigación desarrollado por Jebali, Hadj, Ladet²⁶ se describe un método de dos pasos para abordar con éxito la operación de salas: El primer paso consiste en la asignación de las operaciones de cirugía a las salas de operación, y el segundo paso consiste en secuencializar esa selección de operaciones para mejorar el uso de las salas por medio de un scheduling.

Este mismo enfoque en dos etapas se desarrolla en el trabajo de investigación desarrollado por Li, Q²⁷.

La revisión de la literatura señala que los modelos utilizados con mayor frecuencia para la planeación y programación de las salas de cirugía son los denominados Job Shop Scheduling. Este tipo de problema es de particular interés para el desarrollo del trabajo de la investigación.

²⁵ VELÁSQUEZ-RESTREPO, Paula Andrea. RODRÍGUEZ-QUINTERO, Alma Karina y JAÉN-POSADA, Juan Sebastián. Aproximación metodológica a la planificación y a la programación de las salas de cirugía: una revisión de la literatura. En: Rev. Gerenc. Polit. Salud. Vol 12. 24, 2012.pp.249-266

²⁶ JEBALI, Aïda. HADJ Alouane, ATIDEL B. LADET, Pierre. Operating rooms scheduling. En: Science Direct No. 99, 2006 pp. 52-62

²⁷ Li, Q, Multiobjective Operating Room Planning and scheduling. (2010)En: <http://gradworks.umi.com / 34/32/432430.html>

En el trabajo de investigación realizado por Correa, Rodríguez, Londoño²⁸ se brinda una perspectiva sobre el estado del arte existente en la literatura sobre el desarrollo de los métodos metaheurísticos basados en algoritmos genéticos para el problema del Job Shop minimizando el makespan, y se señala la preferencia que tienen los algoritmos genéticos en la solución de este tipo de problema.

En la revisión que se hizo al trabajo de investigación desarrollado por Demir, Kursat²⁹ se brinda un conjunto de especificaciones básicas para una apropiada parametrización, una acertada definición de sus variables, y una correcta formulación matemática de los principales modelos que se construyen para el problema del Job Shop Scheduling.

De igual modo, en el trabajo desarrollado por Bergamaschi, Gigolini, Perona y Portioli³⁰ se construye un marco de referencia y una orientación para los investigadores que tratan con esta clase de problemas, al desarrollar para este tipo de modelos una clasificación basada en: a) La descripción de los principios fundamentales para su formulación, B) Las características de sus parámetros, variables y restricciones, y c) Las técnicas de implementación.

El trabajo de Gardeya, Deane³¹ describe una revisión con los mismos objetivos, y la investigación que realizó Cardoen y Demeulemeester (2010)³² complementa el estado del arte de los métodos cuantitativos de programación de salas de cirugía con un trabajo desarrollado con base a tópicos como: medidas de rendimiento, tipologías de pacientes y técnicas de solución, configurando la estructura de un detallado marco de referencia para la clasificación e identificación de este tipo de métodos. En otro trabajo de investigación, Cardoen³³, aborda el tema a través de una detallada revisión de la literatura.

²⁸ CORREA ESPINAL, Alexander Alberto, et al. Secuenciación de operaciones para configuraciones de planta tipo flexible Job Shop: Estado del arte. En: Avances en Sistemas en informática, Vol. 5 No. 3, 2008. pp. 151 - 161

²⁹ YUNUS, Demir, S. KÜRSAT Isleyen. Evaluation of mathematical models for flexible job-shop scheduling problems. En: Applied Mathematical Modelling No. 37, 2013 pp. 977-988

³⁰ BERGAMASCHI, D. CIGOLINI, R. et al. Order review and release strategies in a job shop environment: a review and a classification. En: International Journal of Production Research. Vol. 35 No. 2, 1997. p. 399-420

³¹ GARDEYA, V.B. DEANE, R.H. Scheduling research in multiple resource constrained job shops: a review and critique. En: International Journal of Production Research. Vol. 34 No. 8, 1996. pp. 2077-2097

³² CARDOEN, Brecht, Demeulemeester, Belien.J, Optimizing a multiple objective surgical case scheduling problem. En: Dtew-Kbi_0625, 1-38.

³³ CARDOEN, Brecht, Demeulemeester, Belien.J, Operating room planning and scheduling: A literature review. En: European Journal of Operational Research. Vol. 201. 3, 2010. pp. 921-932

El trabajo desarrollado por Kaya, Figliali³⁴ presenta una completa revisión de la literatura sobre modelos Job Shop scheduling para el caso multiobjetivo haciendo énfasis especial en el uso de metaheurísticas.

El esquema del problema de la mochila también ha sido utilizado para la formulación del Job Shop Scheduling. En la investigación realizada por E. Lawler³⁵, se propone tomar como base el conocido algoritmo Moore-Hodgson para ser adaptado para resolver tres casos especiales del problema general de programación. Cada uno de estos casos especiales son formulados como un problema tipo mochila con restricciones de desigualdad anidadas, sin embargo el enfoque abordado en este trabajo presenta una variación conceptual respecto del modelo clásico de la mochila, y es que la meta se formula para minimizar el número de tareas atrasadas. El modelo asigna todas las tareas (atrasadas y no atrasadas) que deben ser procesadas y optimizadas de acuerdo a un tiempo mínimo en una máquina (mochila) que tiene como capacidad el tiempo total sin atrasos.

Por otra parte, en el trabajo realizado por Pradenas, Vidal, Melgarejo (2010)³⁶, se describe una formulación matemática para optimizar la programación semanal de cirugías basada en el problema de la mochila multiobjetivo, trabajado con un algoritmo metaheurístico que facilita la asignación de cirujanos. Al igual que algunos de los modelos de este tipo, también se formula en dos etapas: En la primera, las cirugías son seleccionadas por medio del algoritmo de la mochila, para la segunda etapa, plantea un objetivo enfocado en la solución del problema de asignación de cirujanos, los cuales posteriormente se asignan utilizando un modelo de búsqueda basado en una heurística, en aras de optimizar su número.

Un segundo trabajo realizado por Pradenas, Matamala (2010)³⁷ presenta, para una sola etapa, un algoritmo que optimiza el personal y las salas. Una completa revisión del problema enfocada en soluciones de programación de tareas con recursos restringidos se pudo revisar en el trabajo realizado por Morillo, Moreno, Díaz³⁸. Este

³⁴ SERKAN, Kaya, NILGUN, Figlali. Multiobjective flexible job shop scheduling problems. En: Sigma No. 31, 2013. pp. 605 - 623

³⁵ LAWLER, E.L. Knapsack-like scheduling problems, the Moore-Hodgson algorithm and the 'tower of sets' property. En: Mathematical and Computing Modelling. Vol. 20, No. 2, 1994. pp- 91-106.

³⁶ PRADENAS ROJAS, Lorena. VIDAL.PARADA y MELGAREJO. An algorithm to surgery scheduling and surgeons assignment in a public hospital. En: Revista del Instituto Chileno de Investigación Operativa. Vol. 2. 2012. pp. 20-29.

³⁷ PRADENAS ROJAS, Lorena. Matamala, Exequiel. Una formulación matemática y de solución para programar cirugías con restricciones de recursos humanos en el hospital público. En: Revista del Instituto Chileno de Investigación Operativa. Vol. 2. 2012. pp. 20-29

³⁸ MORILLO, Daniel, MORENO, Luis y DÍAZ, Javier. Metodologías analíticas y heurísticas para la solución del Problema de Programación de Tareas con Recursos Restringidos (RCPSP): una revisión. Parte 2. En: Ingeniería y Ciencia. Vol. 10. 20, 2014. pp. 203-227

trabajo tiene especial relevancia dado que se detallan métodos metaheurísticos, destacando sus principales características, ventajas y desventajas.

Una de las variables más tratadas en los artículos de investigación sobre tópicos relacionados con la optimización de las salas de cirugía es el tiempo. Cuando el objetivo a minimizar es la variable tiempo, este tipo de problemas tiene dos perspectivas: la primera de ellas enfocada a la optimización de los tiempos de las cirugías; la segunda enfocada a la planeación y programación de los procedimientos (el orden en el que se debe llevar a cabo) para minimizar el tiempo total.

Otro factor asociado al problema de la programación de salas, es la forma en que se organiza la lista de espera. Un número considerable de las investigaciones considera más adecuadas las estrategias de líneas de espera (off line) sobre las estrategias en tiempo real (on line). Para armar la base del horizonte de programación se utilizan modelos matemáticos basados en heurísticas o en simulación, como puede inferirse de la revisión de los trabajos de investigación de Yang et al. (2002)³⁹, en Sciomachen et al. (2005) y en la completa revisión sobre estos tópicos en (Cardoen et al., 2008)⁴⁰.

Aunque no se logra caracterizar bajo una misma estructura las características de los modelos para esta tipología de problemas debido a las restricciones propias de cada institución prestadora de servicios de salud (p. ej: tipos de contratos con los cirujanos, anestesiólogos, etc.) y a los objetivos particulares de cada modelo, en el trabajo de investigación realizado por (Zhang et al., 2009)⁴¹ sí se pudo establecer un perfil para las restricciones, describiendo como las más frecuentes: la capacidad tecnológica de las salas, la asignación de equipo médico especializado, los horarios y disponibilidades laborales, las prioridades de programación ante casos críticos, y las restricciones de aislamientos por contaminación.

Parte del trabajo de la revisión de la literatura se enfoca en “fichar” aspectos al interior de los trabajos de investigación, que puedan ser potencialmente útiles para la formulación del modelo de la presente investigación. Basados en esa premisa, se presenta la revisión de una metaheurística de dos niveles (binivel) para la programación y asignación de salas de cirugía, propuesta en el trabajo desarrollado

³⁹ YANG, Xin-She. Introduction to mathematical optimization: From linear programming to metaheuristics. 1 ed. Great Abington: Cambridge International Science Publishing, 2008. 161 p.

⁴⁰ CARDOEN et al., En: En: Jiménez, Angela M. y Velásco, Nubia y Amaya, Ciro. Estrategias de programación de salas de cirugía: Un caso de aplicación en un hospital de Bogotá. En: Los Cuadernos de PYLO, 2008. 17 p.

⁴¹ ZHANG, Q. MANIER, H. y MANIER, M. A. A genetic algorithm with tabu search procedure for flexible job shop scheduling with transportation constraints and bounded processing times. En: Computers and Operations Research. Vol. 39. 7, 2012. pp. 1713-1723

por Aringhieri, Landa et al. (2015)⁴², donde se diseña una metodología para trabajar pacientes por bloques de patologías en salas conjuntas para aprovechar elementos comunes sin alterar la programación de los pacientes, pero se determina tomar en cuenta la metodología binivel como valor agregado, ya que está por fuera del alcance de esta propuesta, dadas las condiciones de complejidad para el problema que se está proponiendo.

El abordaje de estos temas en Colombia no llega a la fase de aplicación, se referencia el trabajo de investigación desarrollado por M. Bejarano (2011)⁴³, enfocado a la descripción de los fundamentos para una evaluación cuantitativa de la eficiencia de las salas de cirugía mediante un caso de estudio de una clínica colombiana, donde se enuncia el “como debiera ser” un modelo de estas características.

1.5 APLICACIONES RELATIVAS A LA UTILIZACIÓN DE MODELOS DONDE INTERVIENEN LOS COSTOS EN LAS SALAS DE CIRUGÍA

La búsqueda de literatura referida al componente de eficiencia para el modelo propuesto para la medición de la rentabilidad, está enfocada desde dos perspectivas medición: la primera como consecuencia del comportamiento de los costos, en donde la perspectiva es la minimización, y la segunda como consecuencia del comportamiento de la utilidad, en donde la perspectiva es la maximización.

En un marco más técnico, los trabajos de revisión de literatura de Jiménez, Guerrero (2007)⁴⁴ abarcan, para el caso colombiano, el tema de la optimización de recursos en hospitales enfocados por la línea de la logística hospitalaria, presumiendo que al estructurar un esquema logístico eficiente se genera una optimización de recursos que causa un comportamiento descendente en los costos.

El trabajo de investigación realizado por Revecó Sepúlveda, Vallejos Vallejos, et al. (2012)⁴⁵, fue realizado con el objetivo de comparar métodos para asignar costos indirectos, y también cabe mencionar el estudio de Tan, Van Ineveld et al. (2009)⁴⁶

⁴² ARINGHIERI, Roberto, et al. A two level metaheuristic for the operating room scheduling and assignment problem. En: Computers & Operations Research. Vol: 54. 2015. pp. 21-34

⁴³ BEJARANO, Mónica. Evaluación cuantitativa de la eficiencia en las salas de cirugía. En: Rev. Colomb. Vol. 26. 2011. pp. 273-284

⁴⁴ JIMÉNEZ, A.M. GUERRERO, J., et al. Optimización de los recursos en los hospitales: revisión de la literatura sobre logística hospitalaria. (2007) 13 p.

⁴⁵ REVECO SEPÚLVEDA, Luis Roberto. VALLEJOS VALLEJOS, Carlos Alberto. Impacto de dos métodos alternativos de asignación de costos indirectos estructurales de hospitales públicos chilenos en el costo final de producción de servicios sanitarios. En: Value in Health Regional Issues. Vol. 1. 2, 2012. pp. 142-149

⁴⁶ TAN, Siok Swan, et al. Comparing methodologies for the allocation of overhead and capital costs to hospital services. En: Value in Health. Vol. 12. 4, 2009. pp. 530-535

que busca determinar si el costo hora, costo día, y asignación de margen de ganancia son medidas confiables para la asignación de tarifas.

Con base en la revisión sobre el componente de eficiencia para el cálculo de la rentabilidad en el área de cirugía, se puede inferir que salvo en el modelo de logística hospitalaria, en los demás trabajos el nivel de implementación de soluciones basadas en algoritmos de programación matemática y en métodos de optimización, es bajo. Sin embargo, existen algunos trabajos sobre el concepto de maximización de la utilidad, enfocados en la teoría de juegos que utilizan la programación matemática para la formulación de sus modelos.

En la revisión del trabajo realizado por Raftery (1999)⁴⁷ se encuentra un referente teórico sobre la rentabilidad, con directrices para reducir al máximo el impacto que ocasionan sobre ella las falencias existentes en los análisis de costos causadas por la enorme variabilidad de complejidades de los procedimientos y las limitaciones para manejarlas, aunque sin evidencia del uso de modelos matemáticos del nivel y características de los métodos de optimización.

En el trabajo de investigación académico práctico realizado por Torres Hinestroza, López (2012)⁴⁸, se propone una metodología para cálculo de costos para las instituciones prestadoras de servicios de salud, utilizando un estrategia basada en la aplicación de GRD's (grupos relacionados de diagnóstico) integrada con dos elementos: la gestión de procesos y los costos ABC, y adicionalmente se lleva a cabo una revisión de la literatura de los estudios realizados con este tipo de metodología, sin embargo, a pesar de que conceptualmente el objetivo es común, metodológicamente ésta investigación se encuentra apartada de los modelos de optimización que se proponen en la presente investigación.

1.6 MODELOS MULTI OBJETIVO

Las técnicas de optimización multiobjetivo están fundamentadas en la resolución de varios objetivos en conflicto para los que se tiene un conjunto de soluciones óptimas de Pareto. Los fundamentos teóricos y los planteamientos matemáticos de esta

⁴⁷ RAFTERY, J. Methodological limitations of cost-effectiveness analysis in health care: implications for decision making and service provision. En: Journal of evaluation in clinical practice. Vol. 5. 2, 1999. pp. 361-366

⁴⁸ TORRES Hinestroza, Arley, et al. Metodología de costos para instituciones prestadoras de servicios de salud : aplicación de los Grupos Relacionados por el Diagnóstico – GRD. En: El hombre y la máquina. Univ. Autónoma de Occidente. Vol. 40. 2012. pp. 31-43

técnica de optimización se revisaron en Coello (2002)⁴⁹ y Coello (2004)⁵⁰ , Branke (2008)⁵¹ y el tutorial de Coello (2009)⁵².

Con los fundamentos revisados, el criterio de búsqueda se enfoca en las investigaciones que involucren formulación de modelos multiobjetivo con la característica de ser resueltos por medio de métodos metaheurísticos y que involucren componentes de la rentabilidad a uno de sus objetivos.

Siguiendo esa línea, primero se revisa el trabajo investigación de A. Zhou et al. (2011)⁵³ sobre el estado del arte relacionado con investigaciones en el desarrollo de problemas multiobjetivo con técnicas metaheurísticas basadas en algoritmos evolutivos,

Continuando con la revisión, el trabajo de investigación realizado por Konak, Coit, Smith⁵⁴ describe un excelente tutorial sobre las técnicas de optimización multiobjetivo usando algoritmos genéticos y presentando una descripción de todas sus variantes, muy útil al momento de evaluar, comparar y seleccionar opciones para desarrollo de modelos de este tipo.

En el trabajo de investigación de Soares & Vieira⁵⁵ se revisa la aplicación de MOA (Multi Objective Algorithm) con algoritmos genéticos en problemas de secuencialización de producción, con excelentes resultados desde los objetivos de optimización en programación y recursos.

Con la premisa de que un solo objetivo puede no ser tan relevante, y basados en la idea de que la eficiencia más que un conjunto o sumatoria de resultados individuales es un fenómeno sistémico, se revisa el trabajo de investigación realizado por H. Parra Riveros (2012)⁵⁶, en el cual se encuentra un estudio exhaustivo de las principales líneas de investigación para la medición de la eficiencia en la prestación

⁴⁹ COELLO, Carlos A., et al., Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems (Genetic Algorithms and Evolutionary Computation). New York, 2002. 610 p.

⁵⁰ COELLO, Carlos A., et al., Applications of Multi-Objective Evolutionary Algorithms. . New Jersey: World Scientific. 2004, 791 p.

⁵¹ BRANKE, Jürgen, et al., Multiobjective Optimization. Berlin: Springer Science+Business, 2008. 481 p.

⁵² COELLO, Carlos A. A tutorial on Multi-objective optimization using metaheuristics. En: Monografías del Seminario Matemático García de Galdeano nn, 1-20 (2009). 20 p.

⁵³ ZHOU, Aimin, et al., Multiobjective evolutionary algorithms: A survey of the state of the art. En: Swarm and Evolutionary Computation. Vol. 1. 1, 2011. pp. 32-49

⁵⁴ KONAK, Abdullah. COIT, David W. SMITH, Alice E. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. En: Reliability Engineering and System Safety No. 91, 2006. pp. 992-1007

⁵⁵ SOARES, Marcio M. y VIEIRA, Guilherme E. A new multi-objective optimization method for master production scheduling problems based on genetic algorithm. En: International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Vol. 41. 5-6, 2009. pp. 549-567

⁵⁶ PARRA RIVEROS, Helien. Metodología para la evaluación de la eficiencia integral en servicios de salud en instituciones públicas prestadoras de servicios de salud (IPS E.S.E.).

de servicios en el sector salud y el alcance de sus aplicaciones mediante el diseño de un modelo cualitativo y cuantitativo. Su trabajo incluye un paneo del contexto nacional y un trabajo metodológico como propuesta a través de un modelo de ecuaciones estructurales denominado VIPLAN, que tiene un elemento importante basado en la asociación de la eficiencia al contexto de la industria de la salud promovida en el documento Compes 3527 del 2008 que establece la política nacional de competitividad.

Posteriormente explora las perspectivas de los modelos no paramétricos y paramétricos, líneas de investigación con formulación de métodos basado en índices, en grupos relacionados de diagnóstico y aplicaciones en Colombia de modelos basados en econometría y en índices específicamente. Al revisar esta investigación se concluye que contempla la construcción de modelos multiobjetivo para medir la eficiencia de los servicios de salud como proceso integrado, sin duda, un documento de referencia sobre el componente de la eficiencia en la medida de la rentabilidad.

La revisión realizada por la línea de optimización multiobjetivo, permitió referenciar el trabajo de investigación realizado por Arenas, Bilbao, Caballero et al. (2002)⁵⁷, en el que se formula un modelo basado en el análisis para mejorar el tiempo de espera en lista para cirugía por la vía de la programación multiobjetivo, con elementos importantes a tener en cuenta en la formulación de restricciones para la presente investigación.

1.6.1 El problema de la mochila multiobjetivo

En la revisión de la literatura se destaca el trabajo de investigación desarrollado por Erlebach, Kellerer y Pferschy⁵⁸, donde se describe el marco de referencia, fundamentos, y características de los diferentes tipos del problema de la mochila multiobjetivo.

Así mismo, en el trabajo de investigación desarrollado por Ishibuchi, Akedo, Nojima⁵⁹ se analiza el comportamiento de tres algoritmos evolutivos en los problemas multiobjetivo asociados al problema de la mochila: el basado en la dominancia de Pareto (NSGA-II), el basado en la función de escalarización (MOEA-D), y el basado en el hipervolumen (SMS-EMOA) con un número de objetivos entre

⁵⁷ ARENAS, M. et al., Analysis via goal programming of the minimum achievable stay in surgical waiting lists. *En: Journal of the Operational Research Society*. Vol. 53. 2002 pp. 387 – 396.

⁵⁸ ERLEBACH, Thomas. KELLERER, Hans. PFERSCHY, Ulrich. Approximating Multiobjective Knapsack Problems. *En: Management Science 2002 Informs*. Vol. 48 No. 12, December 2001 pp. 1603-1612

⁵⁹ ISHIBUCHI, Hisao. AKEDO, Naoya. NOJIMA, Yusuke. Behavior of Multi-Objective Evolutionary Algorithms on Many-Objective Knapsack Problems. *En: IEEE Transactions on evolutionary computation*. Vol. 19 No. 2, 2015. pp. 264 - 283

2 y 10. En este trabajo, se hace referencia a múltiples aspectos el desarrollo y la formulación de modelos, y su contenido brinda elementos importantes para tener en cuenta en la formulación del modelo que se está proponiendo en la presente investigación.

Posteriormente, en el trabajo de Peñuela, Granada⁶⁰, se presenta un modelo multiobjetivo usando algoritmos genéticos y un operador elitista basado en un NSGA-II, que se complementa muy bien con el trabajo realizado por Correa, Bolaños, Molina⁶¹ donde se toma el NSGA-II y se adapta al problema de la mochila. Ambos trabajos contienen elementos claves y hacen parte del material mejor alineado a uno de los objetivos de búsqueda de la revisión de literatura, como lo es el problema de la mochila en su variante multiobjetivo utilizando metaheurísticas.

En el trabajo de investigación realizado por Florios, Mavrotas, Diakoulaki⁶² se aborda el problema multiobjetivo en un caso donde se plantean tres objetivos y tres restricciones utilizando metaheurísticas y métodos exactos. La línea de investigación de éste trabajo aporta elementos muy valiosos en la formulación del modelo planteado en la presente investigación.

1.6.2 Soluciones de optimización multiobjetivo y metaheurísticas para el área de cirugía

La mayoría de los problemas que las empresas deben plantear para dar soluciones a sus requerimientos logísticos, operativos y financieros pueden ser abordados desde el campo de la optimización combinatoria. El planteamiento de este tipo de problemas tiende a ser muy fácil de comprender pero muy difícil para resolver por métodos exactos, debido a que el tiempo de cómputo que consume un método exacto para hallar la solución óptima, en la medida que va creciendo el número de variables es exorbitante, a pesar del desarrollo logrado en el campo computacional.

De manera continua y permanente se incorporan mejoras en los diseños de los algoritmos utilizados en la resolución de este tipo de problemas con el objetivo de optimizar su efectividad y desempeño, y el fenómeno que trata sobre los

⁶⁰ PEÑUELA MENESES, César Augusto. GRANADA ECHEVERRI, Mauricio. Optimización Multiobjetivo usando un algoritmo genético y un operador elitista basado en un ordenamiento no-dominado (Nsga-li). En: Scientia Et Technica, Vol. XIII No. 35, 2007. pp. 175-180

⁶¹ CORREA FLÓREZ, Carlos Adrián. BOLAÑOS, Ricardo Andrés. MOLINA CABRERA, Alexander. Algoritmo multiobjetivo NSGA-II aplicado al problema de la mochila. En: Scientia et Technica. No. 39, 2008. pp. 206-211

⁶² FLORIOS, Kostas. MAVROTAS, George. DIAKOULAKI, Danae. Solving multiobjective, multiconstraint knapsack problems using mathematical programming and evolutionary algorithms. European Journal of Operational Research. Vol 203, 2010.pp14-21

fundamentos y sobre la forma de hacer eficientes esos algoritmos se conoce como complejidad computacional.

Estos avances han facilitado el desarrollo de técnicas de solución para los problemas combinatorios, destacándose entre ellas el uso de los algoritmos metaheurísticos⁶³. Las metaheurísticas surgieron como una serie de algoritmos de búsqueda aproximada, que combinan el potencial de los métodos heurísticos en diseños de mayor nivel, buscando mejorar su nivel de eficiencia y efectividad en la exploración del espacio de soluciones factibles.

El término “metaheurística” fue introducido por Glover en 1986, y también se le conoce con el nombre de heurísticas modernas (Rayward-Smith, V. J., Osman, I. H. et al)⁶⁴.

En la revisión desarrollada por Chen, Lin Hou et al (2010)⁶⁵, se encuentran planteamientos que están alineados a la presente investigación, que tienen que ver con el hecho de que la programación de salas de cirugía no depende solo del éxito de la programación, sino que, además tiene unos factores asociados que no suelen ser de tipo cuantitativo, tales como las urgencias, las re intervenciones y las decisiones de carácter vital para poblaciones sensibles como la pediátrica. Los autores plantean la optimización de salas de cirugía por medio de la programación multiobjetivo, con objetivos cuantitativos y cualitativos.

En el trabajo desarrollado por Chandoul, Hammadi (2012) vale la pena mencionar la presentación de una solución al problema de programación de salas de cirugía que basa su investigación en un enfoque evolutivo para elaborar el algoritmo, formulando un modelo multiobjetivo para la programación de salas de cirugía⁶⁶ donde utilizan los principios fundamentales del modelo FJSP (Flexible Job Shop Problem) para llevar a cabo la analogía con el PSS (Problem of Scheduling Surgical Unit) para formular las funciones que el modelo multiobjetivo plantea optimizar que son: la capacidad de utilización de las salas, el tiempo, y la lista de pacientes.

Un resumen de la analogía se ve en la siguiente tabla:

⁶³ ALFONSO, Hugo, et al. Algoritmos metaheurísticos para optimización y aplicación a problemas NP completos. Universidad Nacional de la Pampa. pp. 5

⁶⁴ RAYWARD-Smith, V. J. OSMAN, I. H. et al. Modern Heuristic Search Methods. New Jersey: John Wiley & Sons, Ltd. , 1996. 314 p.

⁶⁵ CHEN, Chung-Kuang. LIN, Cecilia, et al. A study of operating room scheduling that integrates multiple quantitative and qualitative objectives. En: The journal of nursing research : JNR. Vol. 18. 1, 2010. pp. 62-74

⁶⁶ CHANDOUL, Wided. Evolutionary Approach for Multi-Objective Scheduling in surgical unit. Conference Francophone Gestion et Ingénierie des Systemes Hospitaliers (GISECH 2012) Agosto 2012, Quebec, Canada.

Tabla 1 Analogía entre FJSP y el problema de planeación de salas

Problema de Planeación de trabajos en sistema flexible	Problema de planeación de salas de cirugía
N Trabajos a realizar	N Cirugías a realizar
M Máquinas	R Recursos (humanos + materiales + salas de cirugía)
n_i operaciones para el trabajo i	n_i Tareas para la cirugía i
El Problema: Organizar la ejecución de N trabajos en M Máquinas.	El Problema: Organizar la realización de N cirugías requiriendo R recursos variados
La ejecución de cada operación j del trabajo i ($O_{j,i}$) requiere un recurso (maquina) o más seleccionadas de un grupo de máquinas disponibles.	La ejecución de cada tarea j de una cirugía i ($T_{j,i}$) requiere uno o más recursos, seleccionados de un grupo de recursos disponibles
La asignación de la operación $O_{i,j}$, a la máquina M_k implica la ocupación de esa máquina durante el tiempo que dura en proceso, denominado $d_{i,j,k}$	La asignación de la tarea $T_{i,j}$ con el recurso R_k implica la ocupación de ese recurso durante el tiempo que dura la ejecución de la tarea $d_{j,i,k}$
En un tiempo dado, la máquina solo puede ejecutar una operación, estará disponible para otra operación una vez la tarea haya sido realizada. (Restricción de recursos).	En un tiempo dado, un recurso solo puede ejecutar una operación, y estará disponible para ejecutar otra operación una vez haya realizado la tarea asignada. (Restricción de recursos).

En la revisión se encuentra bajo el mismo enfoque la investigación realizada por Marques, Captivo et al. (2014), en donde se propone un desarrollo basado en programación multiobjetivo con algoritmos genéticos⁶⁷ que optimiza la lista de espera y el uso de recursos en las cirugías.

La tarea de seleccionar cuál técnica metaheurística es mejor no resulta sencilla; la revisión del trabajo de investigación realizado por Blum, Roli (2003)⁶⁸, tiene por objeto destacar un marco conceptual y de comparación, cómo han sido relacionadas en la literatura, cuáles son las ventajas de unas frente a otras y frente a los métodos de optimización convencionales, para un grupo que conforman: la búsqueda tabú, el recocido simulado, la búsqueda local iterativa, vecindad variable descendente, colonia de hormigas y Grasp. En la investigación realizada por De la Cruz, Mendoza, Castillo (2003)⁶⁹, se lleva a cabo la comparación de los algoritmos metaheurísticos Colonia de Hormigas, Recocido simulado, Búsqueda tabú, y un estudio adicional

⁶⁷ MARQUES, Inês, et al. Scheduling elective surgeries in a Portuguese hospital using a genetic heuristic. En: Operations Research for Health Care. Vol. 3. 2, 2014. pp. 59-72

⁶⁸ BLUM, Christian y ROLI, Andrea. Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison. En: ACM Computing Surveys. Vol. 35. 3, 2003. pp. 268-308

⁶⁹ DE LA CRUZ, Jair J. MENDOZA, Adriana. et al. Análisis comparativo de las aproximaciones heurísticas Ant-Q, recocido simulado y búsqueda tabú en la solución del problema del agente viajero. En: Ingeniería y Desarrollo. Vol. 14. 2003. pp. 141-157

también de tipo comparativo realizado por Azimi (2004)⁷⁰ y basado en el problema de programación de horarios, compara el recocido simulado, la búsqueda tabú, la colonia de hormigas y los algoritmos genéticos. Todas las investigaciones concluyen con aportes críticos para estructurar la toma de decisiones de selección.

Continuando la revisión, se encontraron varios trabajos de investigación con características especiales en su formulación. En el trabajo desarrollado por Fei, Chu, Meskens (2008)⁷¹ se aborda el caso donde en algunos hospitales se aplica una estrategia de programación abierta para resolver el problema de la planificación de salas de cirugía; es decir, los cirujanos pueden elegir cualquier día de trabajo para sus especialidades quirúrgicas, y la dotación de personal, de anestesistas y enfermeras está ajustada para maximizar la eficiencia de la utilización de la sala de cirugía, el objetivo es la formulación de un procedimiento heurístico basado en generación de columnas (CGBH), donde se comparan cuatro criterios diferentes entre sí, a fin de encontrar una solución con el mejor rendimiento para un área de quirófanos multifuncionales.

También en la revisión se identificaron dos trabajos, que pese a tener formulación multiobjetivo no contienen información que vincule la rentabilidad en los modelos de optimización propuestos, sin embargo su grado de innovación hace que valga la pena referenciarlos: el desarrollado por Bilgin, Demeester (2012)⁷² en donde programa una hyper heurística para abordar dos problemas de programación en las salas de cirugía: 1)La programación de pacientes, y 2) La programación de los turnos de enfermeras; y el trabajo de investigación desarrollado por Jeric, Figueira (2012)⁷³ sobre la programación de tratamientos médicos para los pacientes internos formulado como un modelo de programación multiobjetivo entera binaria.

1.7 METODOLOGÍAS ADICIONALES PARA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS MULTI OBJETIVO

Como complemento a las metodologías existentes en la resolución de problemas multiobjetivo, se hace referencia al trabajo revisado sobre Optimización

⁷⁰ AZIMI, Zahra Naji. Comparison of metaheuristic algorithms for Examination Timetabling Problem. En: Journal of Applied Mathematics and Computing. Vol. 16. 1-2, 2014. pp. 337-354

⁷¹ FEI, H. CHU, C. y MESKENS, N.. Solving a tactical operating room planning problem by a column-generation-based heuristic procedure with four criteria. En: Annals of Operations Research. Vol. 166. 1, 2008. pp. 91-108

⁷² BILGIN, Burak y DEMEESTER, Peter. One hyper-heuristic approach to two timetabling problems in health care. En: Journal of Heuristics. Vol. 18. 3, 2012. pp. 401-434

⁷³ JERIC, Silvija Vlah y FIGUEIRA, José Rui. Multi-objective scheduling and a resource allocation problem in hospitals. En: Journal of Scheduling. Vol. 15. 5, 2012. pp. 513-535

Lexicográfica⁷⁴ realizado por Zykina, en donde se presenta el fundamento y los principios de éste modelo de optimización. Por otra parte, se revisan los fundamentos y el panorama general de la técnica de Optimización Binivel en los trabajos realizados por G.Eichfelder⁷⁵, y en el trabajo de B.Colson, P.Marcotte, G.Savard⁷⁶.

1.8 ENFOQUES ADICIONALES A LOS MODELOS OPERATIVOS EN EL SECTOR SALUD

Como complemento a los modelos de operaciones y optimización, se revisó un marco de referencia para la calidad en la prestación del servicio, que pudiera tomarse como consulta para el diseño de variables, parámetros y restricciones, asociadas a la construcción del índice sintético. En la revisión del documento de investigación desarrollado por Barrios (2014)⁷⁷, se pueden observar las características básicas que fungen como referentes para los modelos operacionales. Una revisión de la literatura sobre la calidad en el servicio de salud fue desarrollada en el trabajo de investigación de Otálora, Rodríguez Orejuela (2007)⁷⁸, donde se examinan estudios sobre la calidad del servicio y su medición a nivel local y global en las dos últimas décadas.

Partiendo del hecho de que un buen modelo requiere del conocimiento de los objetos que conforman el sistema a modelar, se referencia como guía básica para el conocimiento de las operaciones del área de salud y cirugía, el texto magistral "Introduction to Hospitality Operations, An Indispensable guide to the industry"⁷⁹

Se revisó también en la literatura, información relevante sobre metodologías para la construcción de índices sintéticos, destacándose el texto de Serra, Solans,

⁷⁴ ZYKINA, A.V. A Lexicographic Optimization Algorithm. En: Automation and Remote Control, Vol. 65, No. 3, 2004, pp. 363-368.

⁷⁵ EICHFELDER, G. Multiobjective bilevel optimization. En Math. Program., Ser. A (2010) 123:419–449

⁷⁶ COLSON, Benoît, Marcotte, Patrice, Savard, Gilles. An overview of bilevel optimization. En Annals of Operations Research, Vol. 153, 2007, pp. 235-256

⁷⁷ BARRIOS, Mariela Forrellat. Calidad en los servicios de salud: Un reto ineludible. En: Revista Cubana Hematología, Inmunología y Hemoterapia. Vol. 30. 2, 2014. pp. 179-183

⁷⁸ LOSADA OTÁLORA, Mauricio y RODRÍGUEZ OREJUELA, Augusto Rodríguez. Calidad del servicio de salud : una revisión a la literatura desde la perspectiva del Marketing. En: Cuadernos de Administración. Vol. 20. 34, 2007. pp. 237-258.

⁷⁹ JONES, Peter. Introduction to hospitality operations. An indispensable guide to the industry. Introduction to Hospitality operations: An indispensable guide to the industry. South-Western Cengage Learning, 2002. 317 p.

Espallagues⁸⁰, sobre la eficiencia en la utilización de los bloques quirúrgicos, donde se presentan los fundamentos para la construcción de una batería de indicadores.

En el manual construcción de indicadores de la OCDE⁸¹ y el trabajo realizado por Pérez. F, Peral. F, et al⁸² se describe una visión general sobre el análisis, diseño y aplicación de índices sintéticos. Dentro de esta revisión, cabe destacar el trabajo desarrollado por Segura, Lozano, et al⁸³ donde se describe un caso de diseño de índice sintético para la eficiencia hospitalaria por servicios.

⁸⁰ SERRA.V,SOLANS.M,ESPALLARGES.M, Eficiencia en la utilización de los bloques quirúrgicos. Definición de indicadores Madrid: Plan de Calidad para el Sistema Nacional de Salud. Ministerio de Ciencia e Innovación. Barcelona: Agència d'Informació, Avaluació i Qualitat en Salut, 2011.- 105 p; 24 cm.

⁸¹ OCDE, European Comision, Handbook on Constructing Composite Indicators. Methodology and user guide. 2008.162p

⁸² PEREZ.F, Blancas.F, Gonzalez.M,et.al, Análisis, diseño y comparación de indicadores sintéticos.

⁸³ SEGURA.O,Lozano.E, et.al. Construcción de un Indicador Sintético para medir diferencias en la eficiencia hospitalaria por servicios. En: <http://www.cocmed.sld.cu/no81/ind81.htm>

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

2.1 PROBLEMÁTICA

En Colombia, la demanda por la prestación de servicios de salud desborda ampliamente la capacidad de su infraestructura económica y operacional para absorberla, y se convierte en un factor que a diario pone en riesgo la vida y la salud de un amplio grupo de pacientes, y a su vez, la sostenibilidad de las instituciones que prestan los servicios de salud, que ante la necesidad de sostener y mantener su operación deben racionalizar la prestación de servicios, situación que las estigmatiza frente a la mala prestación del servicio y la baja calidad en la atención.

Con base en lo anterior, el hecho de contar con una herramienta efectiva para la optimización de recursos que logre brindar beneficios a las IPS, y estándares aceptables de calidad de vida a su población, se convierte en un asunto de suma prioridad. Debido a la complejidad del sistema de atención de las IPS, estas herramientas desarrolladas limitan su alcance a ciertas áreas de servicios donde el impacto en los resultados tiene mayor relevancia.

De acuerdo con Gordon et al. (1988)⁸⁴, el área de cirugía es una de las más costosas en una Institución prestadora de servicios de salud, y la rentabilidad de sus procedimientos representa cerca del 40% de la rentabilidad total. Con base en lo anterior se puede inferir, aplicando el principio de Pareto, que una mejora en la rentabilidad para esta área representa una mejora significativa de la rentabilidad de las IPS.

En Colombia, el comportamiento de uso del área de cirugía tiene una tendencia definida: Cerca del 30% de las causales de hospitalización de la población tienen por objeto la realización de una intervención mediante un procedimiento de cirugía⁸⁵, actividad que como ya se mencionó, está asociada a las tarifas de cobro más altas del Manual de tarifas POS.

Esta situación, donde diariamente convergen aspectos fundamentales como la calidad de vida del paciente, su derecho constitucional a que le sea prestado un servicio a tiempo, su estatus de afiliación al sistema de salud, el uso apropiado de las salas como recursos de capacidad limitada, el tiempo y disponibilidad del personal especializado, la relación médico tratante-paciente, la cantidad de usuarios en espera, el esquema de priorización, las preexistencias y comorbilidades

⁸⁴ GORDON, Toby. PAUL, Sharon, et al. Surgical unit time utilization review. En: Journal of Medical Systems. Vol. 12. No. 3, 1988

⁸⁵ PROFAMILIA - Ministerio de Protección Social, Colombia. Afiliación, percepción y uso de servicios del sistema general de seguridad social en salud 18. p. 18 En: Encuesta Nacional de Demografía y Salud (ENDS) 2010. pp. 339-439

en los usuarios para la selección de los diferentes tipos de diagnóstico y tratamiento, y la sostenibilidad de la organización, convierte el área de cirugía en un escenario propicio para la formulación de un modelo multiobjetivo que brinde una forma de seleccionar y secuenciar un conjunto de procedimientos quirúrgicos, con los que se pueda obtener el máximo nivel de impacto en la calidad de vida del paciente, y el máximo beneficio económico para la IPS, con el mejor aprovechamiento de las salas de cirugía, y que pueda expresarse mediante un índice sintético.

2.2 ESQUEMA DE SOLUCIÓN

Para resolver el problema, se formula un modelo matemático alineado a la estructura del problema de la mochila multiobjetivo, que interactúa con un modelo de secuenciación para determinar cuáles cirugías se llevarán a cabo y cuál será su respectiva programación. El modelo multiobjetivo consta de objetivos en dos instancias, basadas en la evaluación financiera y en la evaluación asistencial. Es importante resaltar que la evaluación de la variable asistencial posee un novedoso esquema de transformación de información realizado a través del uso de un modelo de distribución Logit de probabilidad para que la medida obtenida se pueda estimar en escala cuantitativa.

Con el objetivo de acotar el problema para su estudio, a continuación se enuncian algunas de las características que delimitan la presente investigación.

- Se asume en esta investigación, que existe un elemento básico dentro de las IPS, responsable de administrar las listas de usuarios de salas de cirugía, que gestiona, asocia y organiza las solicitudes remisionadas por los médicos y especialistas provenientes de las diversas especialidades clínicas.
- Se relajan aspectos relacionados con las restricciones para la disponibilidad de personal auxiliar y de anestesiología, para lo cual, en el modelo se asumen como irrestrictos, y que, con base a las jerarquías de conocimiento, existe la forma de proveer estos equipos cuando la restricción más importante, que es el médico o grupo de médicos cirujanos, esté disponible.
- Se relajan aspectos como la disponibilidad de camas en las salas UCI y post, pues se tiene el criterio que el modelo de atención de la IPS ha sido diseñado considerando las salas de cirugía como los cuellos de botella dado su alto costo.
- Se tiene en cuenta las características operacionales de las salas, y restricciones en franjas quirúrgicas para llevar a cabo los diferentes tipos de procedimientos.
- Se incluye la diferencia de tarifas existente para cada uno de los procedimientos en función de las distintas modalidades de contratación entre IPS y EPS.
- Para tratar el problema de NO-selección de usuarios con patologías leves, cuyos puntajes de priorización harían que nunca fuesen elegidos, el modelo cuenta con una estructura de ajuste de puntaje en cada iteración para incrementar el puntaje

de la variable de calidad asistencial, basada en un delta del rango de tiempo entre el día de la autorización de la cirugía, y el día de la iteración.

- Existe la libertad de que el médico cirujano no sea el que lo trató en consulta inicialmente.
- No se tienen en cuenta los casos fuera de programación, como el tratamiento prioritario de las urgencias, para las cuales se asigna un porcentaje de uso en las salas basado en el comportamiento histórico. Así como tampoco se tienen en cuenta los efectos de las cancelaciones de último momento por parte de usuarios.

El resultado de este proceso de optimización suministra aquellas cirugías con las que se obtiene el mayor beneficio médico para el usuario, y económico para la institución, organizadas en bloques quirúrgicos para cada una de las salas.

2.3 ESPECIFICACIONES DEL MODELO

2.3.1 Descripción de Objetos básicos usados en el modelo

2.3.1.1 Índices utilizados en el modelo.

Tabla 2 Índices utilizados en el modelo.

CONJUNTO	DESCRIPCIÓN	ÍNDICE	DESCRIPCIÓN	DEFINICIÓN
A	Aseguradores EPS	a	a-ésimo elemento del conjunto de Aseguradores – EPS	$a = \{1,2,3,\dots,A\}$
P	Pacientes inscritos en una lista de espera	p	p-ésimo elemento del conjunto de Pacientes inscritos en la lista de espera	$p = \{1,2,3,\dots,P\}$
D	procedimientos inscritos en el POS ⁸⁶	d	d-ésimo elemento del conjunto de Procedimientos inscritos en el POS	$d = \{1,2,3,\dots,D\}$
R	Salas de cirugía que se encuentran en la IPS	r	r-ésimo elemento del conjunto de Salas de cirugía	$r = \{1,2,3,\dots,R\}$
E	Especialidades quirúrgicas en el POS	e	e-ésimo elemento del conjunto de especialidades quirúrgicas	$e = \{1,2,3,\dots,E\}$
B	bloques quirúrgicos por sala,	br	bloque b-nesimo en la sala r-esima	$b = \{1,2,3,\dots,B\}$

⁸⁶ POS: Plan Obligatorio de Salud

CONJUNTO	DESCRIPCIÓN	ÍNDICE	DESCRIPCIÓN	DEFINICIÓN
S	Cirujanos de acuerdo a las Especialidades quirúrgicas POS	s	s-ésimo elemento del conjunto de cirujanos, asociado a la e-ésima especialidad quirúrgica	$s = \{1, 2, 3, \dots, S\}$
F	Franjas quirúrgicas habilitadas para una programación de salas	f	f-ésima franja asociada a la r-esima sala de cirugía.	$f = \{1, 2, \dots, F\}$
β	Posición en el orden de ejecución de un bloque quirúrgico	β	Posición dentro del orden de ejecución, en la que se ejecutará el bloque B dentro de una sala.	
I	Ítems que evalúan los factores utilizados para el cálculo de la utilidad asistencial	i	Denota el ítem i	$I = \{1, 2, \dots, I\}$

2.3.1.2 Parámetros

Tabla 3 Parámetros utilizados en el modelo.

PARÁMETRO	DEFINICIÓN	NOTACIÓN	DESCRIPCIÓN
M	Tarifa por procedimiento	M_{da}	Tarifa M para el d-ésimo procedimiento para la a-esima EPS
C	Costo Promedio por procedimiento	C_d	Costo promedio C para el d-ésimo procedimiento,
T	Tiempo Promedio por procedimiento	T_d	Tiempo promedio T en minutos estimado para el d-ésimo procedimiento
σ	Desviación estándar del tiempo promedio por procedimiento	σ_d	Desviación estándar en minutos estimada para el d-ésimo procedimiento
W	Factor de peso ponderado asignado a las utilidades financiera y asistencial respectivamente	W_1 W_2	Factor de Peso ponderado asignado a las utilidades financiera (W_1) y asistencial (W_2)
TF	Capacidad de tiempo en minutos de cada una la franjas asignadas a una sala	TF_{fr}	capacidad en minutos de la franja f asignada a una sala r
TS	Disponibilidad en minutos de los cirujanos para cada día de programación	TS_s	Disponibilidad en minutos del cirujano s de la especialidad e

PARÁMETRO	DEFINICIÓN	NOTACIÓN	DESCRIPCIÓN
TR	Disponibilidades de tiempo en minutos para cada una de las salas	TR _r	Disponibilidad en minutos de la sala r
V	Resultado de las valoraciones de los procedimientos respecto de los ítems	V _{pi}	Valoración realizada por el personal especializado para el paciente p respecto al ítem i
Count	Contador de días de espera	Count _p	Rango de tiempo que permanece un usuario en lista de espera
U _{pd}	Parámetro para la asociación del paciente p al procedimiento d	U _{pd}	El valor "1" denota la asociación del p-ésimo paciente al d-ésimo procedimiento, y el valor "0" denota la no asociación entre paciente-procedim
AF _{pa}	Parámetro para la asociación del paciente p a la EPS a	AF _{pa}	El valor "1" denota la asociación del p-esimo paciente a la a-ésima EPS y el valor "0" denota la no asociación entre paciente-EPS.
K _{rf}	Parámetro para la asociación de la franja quirúrgica f a la sala r	K _{rf}	El valor "1" denota la asociación de la f -esima franja a la r-esima sala y el valor "0" denota la no asociación entre franja-sala.
H _{sp}	Asociación del tiempo acumulado del cirujano s realizando los D procedimientos	H _{sp}	Suma del tiempo en minutos de los D procedimientos realizados por el cirujano s
G _{sp}	Asociación de cirujanos a pacientes	G _{sp}	Parametro de asociación entre el cirujano y el paciente. El Valor "1" denota asociación entre el paciente p y el cirujano s. El valor "0" no asocia.
Tini	Tiempo de iniciación del procedimiento realizado al paciente	Tini _p	Tiempo de iniciación en minutos, del procedimiento d realizado al paciente p, desde el punto origen de referencia
TFIN _{rp}	Tiempo finalización del procedimiento realizado al paciente	TFIN _p	Parametro de asociación de la sala y el paciente. El Valor "1" denota asociación entre el paciente p y la sala r. El valor "0" no asocia.

2.1.1.3 Variables

Tabla 4 Variables utilizadas en el modelo.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	NOTACIÓN	DESCRIPCIÓN
UF	Utilidad Financiera del procedimiento d realizado al paciente p , afiliado a la EPS a	UF_p	Diferencia entre la tarifa y el costo promedio del procedimiento para el paciente p . $UF_p = M_{da} - C_d$
J_{rp}	Asociación de salas a a pacientes	J_{rp}	Parametro de asociación de la sala y el paciente. El Valor "1" denota asociación entre el paciente p y la sala r . El valor "0" no asocia.
UA	Utilidad Asistencial para el paciente p	UA_p	Puntaje estimado de calidad asistencial para el paciente p
RF	Rentabilidad Financiera del procedimiento realizado al paciente.	RF_p	Rentabilidad financiera del procedimiento d realizado al paciente p
ρ	probabilidad de respuesta satisfactoria que tiene un ítem	ρ_i	Probabilidad de respuesta satisfactoria respecto de la Habilidad de la clínica, que tiene el ítem i para atender un procedimiento. Se calcula como $\rho_i = \frac{\sum_{p=1}^P V_{pi}}{P}$
HI	Magnitud que representa la habilidad de la IPS respecto del ítem i	HI_i	habilidad de la IPS en el factor representado por el ítem i y se expresa como igual a ρ
CP	Magnitud que representa las valoraciones calculadas para el paciente en cada uno de los ítems que evalúan la calidad asistencial. Su sumatoria arroja el puntaje de la Utilidad asistencial	CP_i	resultado de evaluar la complejidad del paciente p frente al ítem i por medio del modelo logit
$TACU$	tiempo acumulado de los procedimientos realizados en una franja	$TACU_f$	suma de los tiempos de los D procedimientos realizados en una franja f
FCP	Factor de recategorización de Utilidad asistencial por efecto del tiempo de permanencia en lista de espera	FCP_p	Denota la recategorización correspondiente a la Utilidad UA_p por el tiempo de espera.
x_{prs}	Vector que contiene el conjunto de objetos Paciente-Sala-Cirujano, que toma el valor de 1 Si el paciente p es seleccionado y asignado en la sala r y atendido por el cirujano s 0 En caso que el paciente p no sea seleccionado	(x_{prs})	Variable de decisión, denota selección del paciente p afiliado al asegurador a , al que se le va a realizar el procedimiento d en la sala r con el cirujano s

2.3.2 Formulación de Funciones

Función para el cálculo de la Utilidad financiera, en función de la diferencia entre la Tarifa y el Costo promedio del procedimiento

$$UF_p = x_{prs} * \left(\left(\sum_{a=1}^A AF_{pa} \times \sum_{d=1}^D (M_{ad} \cdot U_{pd}^T) \right) - \sum_{d=1}^D ((C_d)^T \cdot U_{pd}) \right) \quad [1]$$

$$\forall p \subset x_{prs}$$

Función para el cálculo de la Rentabilidad financiera, como razón entre la utilidad y los ingresos

$$RF_p = \frac{UF_{ap}}{M_{ad}} = \frac{x_{prs} \times \left(\left(\sum_{a=1}^A AF_{pa} \times \sum_{d=1}^D (M_{ad} \cdot U_{pd}^T) \right) - \sum_{d=1}^D ((C_d)^T \cdot U_{pd}) \right)}{\left(\sum_{a=1}^A AF_{pa} \times \sum_{d=1}^D (M_{ad} \cdot U_{pd}^T) \right)} \quad [2]$$

$$\forall p \subset x_{prs}$$

Función para estimar la probabilidad de respuesta satisfactoria respecto de la Habilidad de la clínica, que tiene el ítem i para atender un procedimiento

$$\rho_i = \frac{\sum_{p=1}^P V_{pi}}{P} = HI_i \quad ; \quad \forall i \in I \quad [3]$$

Función para la estimación de los componentes de la Utilidad asistencial utilizando un modelo Logit de elección discreta. En el Anexo 1 se detalla el procedimiento de cálculo.

$$CP_i = Ln \left(\frac{\rho_i}{(1 - \rho_i)} \right) + HI_i \quad ; \quad \forall i \in I \quad [4]$$

$$CP_i = Ln \left(\frac{HI_i}{(1 - HI_i)} \right) + HI_i$$

Función para Calcular el valor del Índice de Calidad Asistencial estandarizado (0,1)

$$UA_p = \sum_{i=1}^I V_{pi} \times CP_i \quad UA_p \in [0,1] \quad \forall p \subset x_{prs} \quad [5]$$

Función de recategorización del Índice de Calidad Asistencial, inducida por el efecto del tiempo entre la autorización y el día de la programación para los procedimientos no complejos

$$FCP_p = \left(1 + \frac{Count_p}{\sum_{p=1}^P Count_p} \right) \quad \forall p \in P \quad [6]$$

A consecuencia de tener que asumir que debido a las contingencias propias de la práctica médica, los tiempos asignados para las programaciones de acuerdo con las capacidades de las salas no siempre se cumplen, se diseñó una función de penalización tomando como referencia el Valor z para estimar el valor de probabilidad de llevar a cabo la ejecución de la programación dentro del rango de tiempo disponible por sala, con base en una Distribución Normal.

Dicha distribución fue seleccionada luego de evaluar el comportamiento de los tiempos promedio de procedimiento y realizar una distribución por deciles, para luego comparar la curva de distribución observada y contrastarla con el modelo normal. Para hallar el valor de z se definió la siguiente expresión

$$z_r = \left(\frac{\left(TR_r - \sum_{d=1}^D T_d \right)}{\sqrt{\sum_{d=1}^D \sigma_d^2}} \right) ; \forall d \in D \quad [7]$$

Con este cálculo, a medida que disminuye la probabilidad de cumplir la programación debido a las desviaciones, esa probabilidad afectará el valor del objetivo de utilidad para el respectivo conjunto de procedimientos seleccionados.

2.3.3 Función Objetivo

$$[f_1(RF_p), f_2(UA_p)]$$

f_1 se define como la Función para la Optimización de la Rentabilidad financiera del conjunto de los p pacientes afiliados a las a aseguradoras, a quienes que se les practicaron los procedimientos d , en cada una de las franjas programadas en cada una de las salas.

$$f_1(x_{prs}) = \left(\sum_{p=1}^P RF_p \right) \times W_1 ; \forall p \subset X_{prs} \quad [8]$$

f_2 se define como Función para la Optimización de la Utilidad Asistencial del conjunto de los p pacientes afiliados a las a aseguradoras, a quienes que se les practicaron los procedimientos d , en cada una de las franjas programadas en cada una de las salas.

$$f_2(x_{prs}) = \left(\sum_{p=1}^P UA_p \times FCP_p \right) \times W_2 ; \forall p \subset X_{prs} \quad [9]$$

La función objetivo busca los valores estimados por la matriz de pagos para cada objetivo (rentabilidad financiera, y calidad asistencial). Los valores para W_1 y W_2 se configuran a priori por el decisor, en este caso corresponden al 50% para cada uno.

Habida cuenta de lo anterior, a través de una función de distancia L se construirá un índice sintético Q que evaluará los desempeños de las soluciones resultantes de evaluar las diferentes combinaciones de utilidades financieras y asistenciales articulándolas con una función de penalización que se establece como consecuencia del efecto debido a la incertidumbre de las desviaciones en los tiempos estimados para la ejecución de las programaciones, de esta forma:

Se configura la Función de distancia (L), con 6 elementos: F_1 , F_2 , f_1 , f_2 , $f_1(p)$ y $f_2(p)$.

F_1 funge como la Solución de Máximo beneficio financiero posible, obtenida como si se tratara como uniobjetivo; F_2 funge como la Solución de Máximo valor de la Utilidad asistencial.

Ahora bien, f_1 resulta de estimar el valor de la utilidad financiera fuese cual fuere, a partir de los procedimientos que generaron F_2 . Lo propio ocurre con f_2 , que surge

del cálculo de la solución asistencial obtenida, a partir de aquel conjunto de procedimientos con los que se obtuvo la mejor utilidad Financiera.

Por su parte, $f_1(p)$ y $f_2(p)$ son los valores para las respectivas utilidades económica y asistencial del conjunto de procedimientos que se está evaluando para el paciente p .

$$L = \sqrt{\left(W_1 \times \frac{f_1(x_{prs}) - F_1}{f_1 - F_1} \right)^2 + \left(W_2 \times \frac{f_2(x_{prs}) - F_2}{f_2 - F_2} \right)^2} ; \forall p \in x_{prs} \quad [10]$$

La función de penalización para la programación de las salas, expresada como el promedio de los valores de probabilidad de llevar a cabo dentro del tiempo la programación en cada sala.

$$f_3(T_d, \sigma_d, z_r) = \frac{\sum_{r=1}^R (z_r \sim N(0,1))}{R} \quad [11]$$

2.3.3.1 Índice Sintético Q como función objetivo

Construcción del Índice sintético

$$Q = L \times f_3(T_d, \sigma_d, z_r)$$

Índice sintético como función Objetivo

$$MinQ = \left(\sqrt{\left(W_1 \times \frac{f_1(x_{prs}) - F_1}{f_1 - F_1} \right)^2 + \left(W_2 \times \frac{f_2(x_{prs}) - F_2}{f_2 - F_2} \right)^2} \right) \times \frac{\sum_{r=1}^R (z_r \sim N(0,1))}{R} \quad [12]$$

2.3.4 Restricciones

Sujeto a:

$\sum_{f=1}^F \sum_{r=1}^R \sum_{p=1}^P \left((x_{prs} \times T_d \times J_{pr}^T)^T \times (G_{ps}) \right) \times K_{rf} \leq TS_s$ $\forall p \subset x_{prs}, \forall f \in F, \forall r \in R$	<p>El tiempo empleado por el cirujano en los procedimientos que realiza en las diversas salas durante las respectivas franjas debe ser menor o igual a la disponibilidad de tiempo.</p>	<p>[13]</p>
$\sum_{f=1}^F \sum_{r=1}^R \sum_{p=1}^P \left(x_{prs} \times T_d \times J_{pr}^T \right) \times K_{rf} \leq TF_{rf}$ $\forall p \subset x_{prs}, \forall r \in R$	<p>La suma de los tiempos de ejecución de los procedimientos no debe superar la capacidad de las franjas quirúrgicas por sala.</p>	<p>[14]</p>
$\sum_{f=1}^F \sum_{r=1}^R TF_{rf} \leq TR_r \quad \forall r \in R ; \forall f \in F$	<p>Para cada sala, la suma de los tiempos de las franjas no debe superar la capacidad de tiempo de la sala.</p>	<p>[15]</p>
$\sum_{p=1}^P J_{rp} \leq 1 ; \forall p \subset X_{prs}$ $\sum_{p=1}^P (J_{rp} \times G_{ps}) \leq 1 ; \forall p \subset X_{prs}$	<p>No está permitida la selección de un paciente más de una vez en una misma programación.</p>	<p>[16]</p>
$\sum_{S=1}^S G_{ps} \leq 1$ $\forall s \subset X_{prs}$	<p>No esta permitida la asignación de dos cirujanos a un mismo paciente.</p>	<p>[17]</p>
$\sum_{p=1}^{\Omega} \sum_{s=1}^S (G_{ps} \times TFIN_p) \leq TFIN_{\Omega+1} - \sum_{p=1}^P T_d \times U_{pd}$ $\forall p \subset x_{prs} ; \forall s \subset x_{prs} ; \Omega > 1$	<p>No está permitido que un cirujano esté en dos salas al mismo tiempo.</p>	<p>[18]</p>
$x_{psr} \in [0,1] ; x_{psr} = 0 \vee x_{psr} = 1$ $\forall p \subset x_{prs}, \forall s \in S$	<p>Variable decisoria.</p>	<p>[19]</p>

3. METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN PARA PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO POR MEDIO DE UN ALGORITMO GENÉTICO

La metodología para el diseño de la solución al problema de la presente investigación está basada en los siguientes elementos principales:

- Optimización Multiobjetivo
- Problema de la Mochila como estructura para la formulación de problemas combinatorios
- Algoritmos Genéticos
- Código de programación en Matlab
- Índices Sintéticos
- Esquema para Priorización de pacientes

Como ya se mencionó anteriormente, la solución a este problema consiste en la obtención de una rentabilidad y un nivel de atención equilibrados, lo que se denomina un Gana-Gana, a partir de la selección de un conjunto de usuarios a quienes se les va a realizar un procedimiento de cirugía, y que, ordenados en bloques quirúrgicos de acuerdo a sus características de diagnóstico, son asignados a las respectivas salas de cirugía, para una iteración diaria. El proceso se repite tantas veces como días se desee programar.

Para cumplir con este propósito, se decide abordar el esquema de solución que brinda el problema de la mochila para simular el comportamiento diario de las salas de cirugía, en donde la función objetivo corresponde a la maximización de un beneficio total que debe resolverse como problema multiobjetivo. Para evaluar el desempeño de las soluciones se elaboró en MATLAB un instrumento de medida denominado Índice Sintético que utilizó un algoritmo genético MOGA para la generación de las soluciones (ver Anexo 2). El índice, articula los resultados del algoritmo con la gestión de uso de los quirófanos para brindar una medida integral del desempeño que se pueda evaluar en el tiempo.

A continuación se describe el proceso, desarrollado desde la perspectiva de la programación orientada a objetos.

3.1 ALGORITMOS GENÉTICOS

Las soluciones a los problemas de optimización mediante el uso de Metaheurísticas están diseñadas para resolver problemas en donde otros métodos son ineficientes y son reconocidas por su utilidad para resolver problemas complejos.

Algunas de las metaheurísticas más conocidas son: Búsqueda Tabú, algoritmos Genéticos, recocido simulado, y colonia de hormigas, y su objetivo primordial es

adaptar un problema particular, a su formato de operación. Por su parte, los algoritmos genéticos basan su enfoque de solución en el proceso de evolución y herencia que presentan los seres vivos, partiendo del hecho de que aquellos individuos que poseen las mejores características tendrán mayores posibilidades de supervivencia.

Un algoritmo genérico, se compone de cinco elementos fundamentales⁸⁷:

- Un cromosoma como representación genérica de la solución
- Un mecanismo de generación para la población inicial
- Una función que evalúe el desempeño del organismo (fitness)
- Un mecanismo que lleve a cabo el proceso de cruzamiento entre organismos por medio de la definición los operadores genéticos de selección de padres, de un punto de cruce y una tasa de mutación.
- Estimaciones de los parámetros tales como el tamaño de la población, criterios de parada, y tasa de mutación.

3.1.1 Enfoques de solución a problemas multiobjetivo por medio de algoritmos genéticos

Algunas de las formas de solución son las siguientes:

- *Vector evaluated genetic algorithm (VEGA)*, fue uno de los primeros modelos que se trabajaron para la resolución de problemas multiobjetivo. Utiliza varios operadores genéticos en elementos de diversas subpoblaciones, generalmente hay tantas subpoblaciones como objetivos, y se va caracterizando a los individuos que tienen soluciones no dominadas. Se da preferencia a los mejores individuos en uno de los objetivos y se brindan las posibilidades acordes para la selección de aquellos individuos que son mejores que la media en más de un objetivo.
- *Multiobjective genetic algorithm(MOGA)* El procedimiento general del algoritmo hasta obtener una población mejorada es el siguiente: definir una población de inicio, evaluar las funciones objetivo, identificar los rangos de acuerdo con los frentes de Pareto, determinar una función de adaptación lineal generalmente una función de distancia, determinar sus valores de función, cruzar los individuos y mutar los individuos hasta que se cumpla el criterio de parada.

⁸⁷ D.E.Goldberg. The Design of innovation:Lessons from and for competent genetic algorithms. Kluwer Academic Pub.,2002

3.2 OBJETOS BÁSICOS

3.2.1 Lista de EPS

La lista de las EPS es una matriz de D registros \times 2 campos para la entrada de datos para la codificación y el registro de las EPS que hacen parte de los convenios con la respectiva IPS. Su estructura de datos es la que aparece a continuación con algunos datos ilustrativos:

Tabla 5 Lista de EPS

LISTA EPS	
IdEPS	Nombre
IdEPS-001	Famisanar
IdEPS-002	Coomeva

3.2.2 Lista de Franjas

La lista de franjas es una matriz de M registros \times 3 campos para la entrada de datos para la codificación de las franjas quirúrgicas abiertas en las salas de cirugía. Su estructura de datos es la que aparece a continuación con algunos datos ilustrativos:

Tabla 6 Lista de Franjas

FRANJAS QUIRÚRGICAS		
IdFranja	Nombre	Minutos
F1	6:00am-12:00m	320
F2	12:00pm-6:00pm	360
F3	6:00am -6:00pm	720

3.2.3 Lista de Quirófanos

La lista de quirófanos es una matriz de K registros \times 3 campos para la entrada de datos para la codificación y la descripción de las salas, y para la asignación de su capacidad. Su estructura de datos es la que aparece a continuación con algunos datos ilustrativos:

Tabla 7 Lista de Quirófanos

LISTA QUIRÓFANOS		
IdSala	Nombre	Capacidad
SaCx-01	Quirófano N° 1	Cr1
SaCx-01	Quirófano N° 1	Cr2
SaCx-02	Quirófano N° 2	Cr3

3.2.4 Asociación de franjas a salas

La lista de asociación de franjas a salas es una matriz de r salas \times f franjas que permite la adecuada distribución de franjas con base en las disponibilidades de la clínica.

Tabla 8 Matriz de Franjas y Salas

MATRIZ DE FRANJAS Y SALAS			
IdSala	Franja 1	Franja 2	Franja 3
SaCx-01	1	0	0
SaCx-01	0	1	0
SaCx-02		0	1

3.2.5 Lista de Especialidades quirúrgicas

La lista de especialidades quirúrgicas es una matriz de L registros \times 2 campos para la entrada de datos para la codificación y descripción de las especialidades quirúrgicas que maneja la IPS. Su estructura de datos es la que aparece a continuación con algunos datos ilustrativos:

Tabla 9 Lista de Especialidades quirúrgicas

ESPECIALIDADES QUIRÚRGICAS	
IDEspecialidad	Nombre
ESP-1	intervenciones quirúrgicas en la especialidad de neurocirugía
ESP-2	intervenciones quirúrgicas de Oftalmología
ESP-3	intervenciones quirúrgicas de Otorrinolaringología
ESP-4	intervenciones quirúrgicas de las Glándulas Tiroides y Paratiroides
ESP-5	intervenciones quirúrgicas Cardiovasculares

ID Especialidad	Nombre
ESP-6	Intervenciones quirúrgicas del Tórax
ESP-7	Intervenciones quirúrgicas abdominales
ESP-8	Intervenciones quirúrgicas de proctología
ESP-9	Intervenciones quirúrgicas de Urología y Nefrología
ESP-10	Intervenciones quirúrgicas de la Mama
ESP-11	Intervenciones quirúrgicas de Ginecología
ESP-12	Intervenciones quirúrgicas y procedimientos de Obstetricia
ESP-13	Intervenciones quirúrgicas y procedimientos de Ortopedia y Traumatología
ESP-14	Intervenciones quirúrgicas y procedimientos en la especialidad de Cirugía de Mano
ESP-15	Intervenciones quirúrgicas de la especialidad de Cirugía Plástica
ESP-16	Intervenciones quirúrgicas y procedimientos de las especialidades de Cirugía Oral y Maxilofacial y Dental

3.1.6 Lista de Cirujanos

La lista de cirujanos es una matriz de *O registros x 4 campos* para la entrada de datos para la codificación, registro, disponibilidad y especialidad de los cirujanos que tienen vínculos laborales o contractuales con la IPS. Su estructura de datos es la que aparece a continuación con algunos datos ilustrativos:

Tabla 10 Lista de Cirujanos

LISTA CIRUJANOS				
IdCirujano	Nombre	ID Especialidad	Disp Franja	Capac
IdCx-01	Dr -D1	ESP-4	1	Cs1
IdCx-02	Dr -D2	ESP-7	0	Cs2
IdCx-03	Dr -D3	ESP-7	0	Cs3
IdCx-04	Dr -D4	ESP-12	1	Cs4

3.1.7 Lista de Márgenes de negociación con EPS

La lista de Márgenes de negociación es una matriz de *W registros x 3 campos* para la relación de tarifas para los distintos procedimientos, acordadas con las EPS para

efectos de Facturación. Su estructura de datos es la que aparece a continuación con algunos datos ilustrativos:

Tabla 11 Lista de Márgenes de negociación con EPS

MARGEN DE NEGOCIACIÓN CON LA EPS RESPECTO AL MANUAL TARIFARIO SOAT		
IdEPS	Especialidad/grupo quirurg	%
IdEPS-001	ESP-4	%1
IdEPS-001	ESP-7	-%2
IdEPS-002	ESP-7	%3
IdEPS-003	ESP-12	%4

3.1.8 Lista de Procedimientos

La lista de procedimientos es una matriz de *W registros x 9 campos* para la identificación y registro de los parámetros y características asociadas a los procedimientos. Su estructura de datos es la que aparece a continuación con algunos datos ilustrativos:

Tabla 12 Lista de Procedimientos

LISTA DE PROCEDIMIENTOS								
IdProc	Nombre Proced	ID Especialidad	Grupo Quirurg	Costo Promed	Tiempo Promed	Desv St	Tarif a SOAT	Habilidad Institucional (HI)
1101	Craneotomía para extracción cuerpo extraño; incluye esquirlectomía	ESP-1	9	\$\$	\$\$	\$\$	\$\$	0,29
1102	Craneotomía para drenaje hematoma epidural o subdural	ESP-1	20	\$\$	\$\$	\$\$	\$\$	0,37
1103	Craneotomía para extracción secuestro	ESP-1	8	\$\$	\$\$	\$\$	\$\$	0,29
1104	Craneotomía para drenaje de hematoma de fosa posterior	ESP-1	20	\$\$	\$\$	\$\$	\$\$	0,55

3.1.9 Lista de Pacientes en la lista de espera

La lista de pacientes es una matriz de *W registros x 5 campos* para la identificación del paciente y el registro de los parámetros y características asociadas al procedimiento a realizar, así como el campo calculado *días de espera* fuente para

el proceso de recategorización por su actualización diaria automática. Su estructura de datos es la que aparece a continuación con algunos datos ilustrativos:

Tabla 13 Lista de Pacientes en la lista de espera

LISTA DE PACIENTES				
IdPac	Fecha AutorizCx	Días de Espera	IdEPS	Utilidad Asisten
IdPac-001	Fecha 01	45	IdEPS-001	0,69
IdPac-002	Fecha 02	31	IdEPS-001	0,98
IdPac-003	Fecha 03	8	IdEPS-003	0,74
IdPac-004	Fecha 04	6	IdEPS-00a	0,79
IdPac-005	Fecha 05	29	IdEPS-003	0,86
IdPac-006	Fecha 06	17	IdEPS-001	0,93

3.3 ASPECTOS DETERMINANTES RELACIONADOS CON LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD ASISTENCIAL

Cuando se quieren medir variables no observables como “la calidad”, el “nivel de satisfacción” o el “estado de salud y bienestar” de una población, los resultados generalmente están expresados por medio de puntajes (1) obtenidos con instrumentos que tienden a presentar valoraciones no del todo claras: ¿acaso se podría afirmar que alguien que ha calificado con 4 su nivel de satisfacción por el servicio recibido en un hotel se habrá sentido exactamente la mitad de bien que alguien que calificara su experiencia con un 8? En este caso, la variable es de tipo cualitativo y está expresada en una escala ordinal (2).

El nivel de calidad asistencial del paciente se configuró como una variable no observable (UA_i) utilizada para describir el grado de importancia que tiene un procedimiento en el logro de un nivel aceptable de la calidad de vida del paciente, grado que se determina por medio de la presencia o ausencia de ciertos rasgos (3) que solo pueden ponerse en evidencia y ser detectados por medio de un conjunto de ítems que son conocidos como reactivos (enunciados en forma de pregunta diseñados para recolectar evidencia de la presencia o ausencia de una característica o rasgo en un objeto evaluado) (4).

La medida de la variable (UA_i) se definió por el resultado de la interacción entre el contexto del usuario y la patología para la que requiere un procedimiento (CP_{pi}), y el contexto del procedimiento y la experiencia de tratamiento en la IPS (HI_i).

El contexto del procedimiento y la experiencia de tratamiento en la IPS fueron estructurados por medio de un conjunto de ítems, definidos y diseñados específicamente para la detección de aquellos rasgos determinantes que dan

cuenta del nivel de calidad asistencial. Estos ítems, al construirse y ordenarse estratégicamente, pueden agruparse en componentes o factores (De la Garza, Morales & González, 2013). El nivel que presentan los usuarios en cada uno de los rasgos se asoció al resultado de sus respectivos comportamientos frente al conjunto de ítems.

Como cualquier otra variable continua, el “nivel de calidad asistencial del procedimiento” se representó por medio de una línea recta a lo largo de la cual se situaron los ítems y los usuarios de las salas de cirugía. A medida que se avanza hacia la derecha de la línea, cada punto implica “mayor cantidad” de la variable.

¿Cuál fue el criterio para ubicar los ítems y los usuarios en la línea de medida?

En la FIGURA 1 se observa el modo en que usuarios e ítems se pueden encontrar distribuidos a lo largo de la línea que representa la variable no observable, que va de cero a infinito.

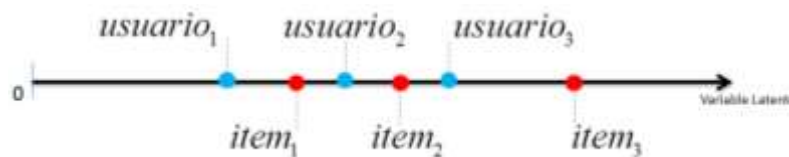


FIGURA 1 Representación ítems y usuarios sobre la línea de la variable no observable

Si el rasgo que representa el ítem 1 es el de menor medida, este estará presente en los usuarios 2 y 3, pero no en el usuario 1. También se puede observar que el rasgo que representa el ítem 3 no está presente en ninguno de los usuarios (5).

De este modo, se pudo concluir que un usuario tendrá un mayor nivel de calidad asistencial en la medida en que presente mayor número de rasgos.

Habida cuenta de lo anterior, para que se pudiera afirmar que un paciente $P_{(p)}$ posee un determinado rasgo caracterizado por el ítem $I_{(i)}$ fue necesario que este rasgo se detectase mediante una evidencia, que se pone de manifiesto cuando para las medidas de $P_{(p)}$, $I_{(i)}$ se cumpla la siguiente condición: $P_{(p)} > I_{(i)}$.

Al existir varios usuarios con diferentes niveles de calidad asistencial, sus diferencias se hicieron manifiestas a través del conjunto de rasgos que componen los ítems, y permitieron establecer sus posiciones respecto a ellos.

La evidencia requerida para establecer la ausencia o presencia del rasgo en los usuarios se pudo determinar por medio de un modelo dicotómico de elección discreta de respuesta para el conjunto de los ítems, en el cual, si la respuesta del usuario $P_{(p)}$ al ítem $I_{(i)}$ tomó el valor de $V_{(pi)} = 1$ se afirmó que el usuario $P_{(p)}$ posee el atributo caracterizado por el ítem $I_{(i)}$, y si el valor fue $V_{(pi)} = 0$, se consideró

lo contrario. Este hecho permitió formular un modelo en el cual un usuario $P_{(p)}$ que tiene una determinada patología al interactuar sobre el ítem $I_{(i)}$ que caracteriza aspectos de la IPS sobre el procedimiento $D_{(d)}$, produjera una respuesta $V_{(pi)}$.

¿Todos los unos significan lo mismo?

En los modelos de elección discreta esa respuesta, bien sea para 1 o para 0, surge de la relación de interacción que se produjo entre la patología del usuario y la experiencia de la IPS en el manejo del procedimiento. Para poder expresarla se requirió de la búsqueda de un método que produjera una respuesta que siguiera el modelo de la Tabla 1. Los modelos de elección discreta del tipo Logit cumplen con estos criterios (6).

Si en un juego de azar hubiese una regla o condición que asignara, por ejemplo, el valor de “1” al hecho de haber sacado un seis, y un cero al hecho de sacar cualquier otro número, ese “1” tiene que ver con las probabilidades: no es lo mismo sacar un seis al tirar un dado, que sacarlo de una bolsa donde hay balotas numeradas del 1 al 50. Sin embargo, para cualquiera de los dos escenarios si se obtiene un seis, aparecerá un “1”.

De la misma forma en que se puede estimar lo difícil que puede ser sacar un “1” en el ejemplo anterior, se pudo estimar la probabilidad de ese “1” y de ese “0” que aparecen en la tabla de los datos (7).

Al haber encontrado un modelo probabilístico para la estimación de la respuesta al cual se ajustan los datos, se logró convertir una escala ordinal en una escala numérica continua (Wright, 1977).

El modelo se describió por medio del comportamiento de dos parámetros:

$CP_{(pi)}$ = la complejidad de la patología del usuario $P_{(i)}$ evaluada en el criterio del ítem j

$HI_{(i)}$ = la habilidad de la IPS en el manejo del procedimiento del paciente $P_{(p)}$ en el ítem $I_{(i)}$

Los anteriores parámetros se pudieron relacionar para calcular la probabilidad de acierto (obtener el valor de 1 para la variable V) a un ítem mediante el diseño de una función en términos de la diferencia ($CP_{pi}-HI_i$) a través de un intervalo de 0 a 1 por medio de la siguiente transformación Logit:

$$P(X_i = 1 | CP_i - HI_i) = \frac{e^{(CP_i - HI_i)}}{1 + e^{(CP_i - HI_i)}}$$

$$(CP_i - HI_i) = \text{Ln}\left(\frac{\rho_i}{1 - \rho_i}\right)$$

FIGURA 2 Modelo Logit

Ver: Anexo 1 para ampliación de los detalles de la presentación del modelo y para el cálculo de las estimaciones.

Ver: Anexo 3 para un detalle de los criterios de diseño del instrumento de medida de la calidad asisencial

3.4 CARACTERÍSTICAS DEL ALGORITMO GENÉTICO

3.4.1 Configuración de los elementos del Gen, y definición de la codificación de las variables de decisión

El contenido del gen corresponde a la estructura de un objeto que se compone de tres elementos **U**, **V**, **W**, como se puede apreciar en la siguiente figura:

Estructura del Cromosoma					
GEN 1			GEN 2		
U	V	W	U	V	W
objeto 1			objeto 2		

FIGURA 3 Estructura del Cromosoma

El primero de los elementos, **U**, es el paciente P_p proveniente de la lista de espera, que se encuentra afiliado a la EPS A_a , y que presenta una patología que va a ser tratada mediante un procedimiento quirúrgico D_d , que pertenece a la especialidad E_e . La decisión asociada al elemento U se define a continuación:

$$U \begin{pmatrix} 1 \text{ El paciente } P_i \text{ es seleccionado para conformar la población inicial} \\ 0 \text{ En caso Contrario} \end{pmatrix}$$

El segundo elemento, **V**, corresponde a la sala R_r que va a seleccionarse para ubicar al paciente que se acaba de seleccionar. Debe cumplir con la condición de que la realización del procedimiento pueda ser posible allí. La variable de decisión asociada al elemento V se define a continuación:

$$V \begin{pmatrix} 1 \text{ La sala } R_r \text{ es seleccionada para conformar la población inicial y asignar el paciente } P_i \\ 0 \text{ En caso Contrario} \end{pmatrix}$$

El último elemento, W , corresponde al cirujano S_{se} que va a seleccionarse para tratar al paciente que se acaba de asignar a la sala R_r . La variable de decisión asociada al elemento W se define con una condición asociada a que el cirujano seleccionado cumpla con la especialidad para tratar la patología. Se define a continuación:

$$W \begin{pmatrix} 1 \text{ El cirujano } S_{se} \text{ es seleccionado para tratar el paciente } P_i \text{ y tiene la especialidad} \\ 0 \text{ En caso Contrario} \end{pmatrix}$$

Para que un objeto pueda ingresar y formar parte del gen de un cromosoma en la población de organismos, debe poseer una codificación correspondiente a 1 1 1, por esta razón la variable que se configura es

x_{prs} Descrita como la variable de selección del paciente p asignado a la sala r , atendido por el cirujano s .

3.4.2 Configuración de la matriz de la población inicial

La población inicial, a partir de la lista de espera con entrada *online*, se establece con un límite de entrada de 140 organismos de los cuales el 10% es generado con características específicas, y el 90% de forma aleatoria.

3.4.2.1 Definición de la estructura de la matriz:

La matriz de la población inicial tendrá como filas los diferentes organismos que conforman el número finito de miembros, y como columnas los genes que conforman cada uno de los organismos.

Número de filas:	Máximo 200 organismos.
Número de Columnas:	<p>Para establecer el número de columnas, se toma la siguiente expresión que hace referencia al número máximo probable de procedimientos que se pudieran realizar con todo el tiempo de las salas disponible si se ejecutase el procedimiento más corto.</p> $Ncol = \frac{\sum_{f=1}^F \sum_{r=1}^R TF_{fr}}{Min(T_d)}$

3.4.2.2 Definición del modo como se conforma la matriz con el perfil de los organismos que ingresan:

La matriz de la población inicial tendrá el 10% de sus organismos conformados con objetos que cumplen con los siguientes criterios

Tabla 14 Estructura de las soluciones heurísticas para la población inicial

Solución propuesta en el organismo N°1	Solución con los pacientes que poseen la más alta utilidad económica
Solución propuesta en el organismo N°2	Solución con los pacientes que poseen la más alta utilidad asistencial
Solución propuesta en el organismo N°3	Solución con los pacientes que poseen los menores tiempos de procedimientos
Solución propuesta en el organismo N°4	Solución con los pacientes que poseen los mayores tiempos de procedimientos
Solución propuesta en el organismo N°5	Solución con los pacientes que poseen la mayor relación costo/tiempo
Solución propuesta en el organismo N°6	Solución donde el organismo intercala sus genes poniendo un paciente con la mejor utilidad financiera y luego uno con la mejor utilidad asistencial
Solución propuesta en el organismo N°7	Solución donde el organismo intercala sus genes poniendo un paciente con la mejor utilidad financiera , luego uno con la mejor utilidad asistencial, luego uno con el menor tiempo
Solución propuesta en el organismo N°8	Solución donde el organismo intercala sus genes poniendo un paciente con la mejor utilidad económica , luego uno con la mejor utilidad asistencial, luego uno con el menor tiempo y luego uno con la mejor relación costo/tiempo

El restante 90% se configurará en forma aleatoria.

3.4.2.3 Definición del modo en que se organiza y controla el llenado de la matriz evitando la duplicidad de pacientes en los organismos que ingresan a la matriz:

La matriz de la población se alimenta de cada objeto que ingresa a ella en forma secuencial organismo a organismo. Para evitar conflictos, como que un paciente sea seleccionado en un objeto dentro de una sala, y se encuentre en otro objeto dentro de otra, se realiza un proceso de verificación como se describe en la siguiente figura

Organismo 1	0	For i = 1 PARA cargar los alelos en el primer Organismo:		
	ini			
	GEN 1	1	Ordenar por Uecon & Jerarquia=1 SELECT U	(Se propuso un paciente-Procedimiento)
		2	aleatorio SELECT V	verificacion para validar llave procedimiento-procedimiento SI NO (regresa a 2) (se ha propuesto sala y se ha verificado Tiempo<Capacidad Sala)
		3	aleatorio SELECT W	verificacion para validar llave procedimiento-procedimiento verificacion de disponibilidad en dia SI-SI SI-NO; NO-SI -NO.NO (regresa a 3) (se ha propuesto cirujano)
	GEN 2	4	Jerarquia=2 SELECT U	verificacion para validar NO duplicidad SI NO (regresa a 4) (Se ha propuesto otro paciente)
	5	repite paso 2	(se ha propuesto otra sala, o la misma) Se ha verificado : sumaTiemposx sala < CapSala	
		repite paso 3	(se ha propuesto otro cirujano o el mismo)	
	6	se itera hasta que se llena el numero de genes del cromosoma		

FIGURA 4 Algoritmo de llenado de los genes

	Gen1	Gen2	Gen3	Gen4	Gen5	Gen6
Org1	Org1-Obj1	Org1-Obj2	Org1-Obj3	Org1-Obj4	Org1-Obj5	Org1-Obj6
Org2	Org2-Obj1	Org2-Obj2	Org2-Obj3	Org2-Obj4	Org2-Obj5	Org2-Obj6
Org3	Org3-Obj1	Org3-Obj2	Org3-Obj3	Org3-Obj4	Org3-Obj5	Org3-Obj6
Org4	Org4-Obj1	Org4-Obj2	Org4-Obj3	Org4-Obj4	Org4-Obj5	Org4-Obj6

FIGURA 5 Estructura de la población inicial

La siguiente figura muestra una sección de la matriz una vez finalizado el proceso de carga de objetos

3.4.2.4 Generación de bloques quirúrgicos:

Los objetos (alelos) de cada uno de los organismos que componen la matriz de población son organizados por medio de un algoritmo de ordenamiento que reagrupa los procedimientos dentro de cada sala con base en su código, creando los denominados Bloques Quirúrgicos para cada sala, pilar fundamental en el desarrollo del algoritmo genético. La siguiente figura detalla con un ejemplo para tres salas el proceso de reagrupamiento por bloques para el primer organismo:

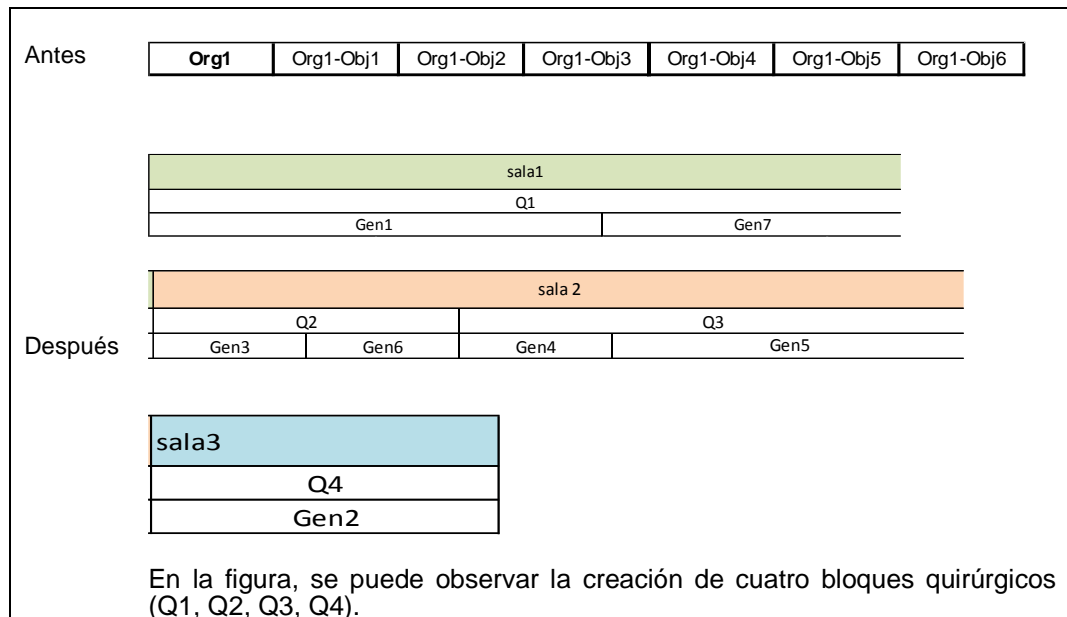


FIGURA 6 Generación de bloques quirúrgicos

3.4.3 Descripción del proceso de recombinación o cruzamiento

Para determinar entonces cuales individuos de la población tienen derecho a tener descendientes, y cuantos por cada uno, se utilizó una función que permite definir cuantos hijos se merece cada miembro de la población, con base en el desempeño de su función objetivo. La función está definida por

$$N^{\circ}Desend = \frac{fObj_o}{g} \quad g = \frac{\sum_{o=1}^{NEP} fObj_o}{NEP} ; o \text{ es el } o\text{-ésimo organismo de la población}$$

NEP: Numero de Elementos de la Población

Conocido el número de hijos posibles por cada organismo, se utilizó un algoritmo para ejecutar el proceso de selección por ruleta,⁸⁸ de aquellos padres que van a dar origen a la siguiente generación.

3.4.4 Descripción del proceso de definición del punto de cruce

Teniendo en cuenta la forma como se definieron las variables de decisión para la creación del objeto que compone cada gen dentro del cromosoma que caracteriza cada organismo, es importante mencionar que para el proceso de cruce se evitó

⁸⁸ COLEY.DAVID A, An introduction to genetic algorithms for scientists and engineers. UTO print, 1999.

que luego de la combinación entre los cromosomas definidos como Padre y Madre, se presente la duplicidad de elementos que componen los objetos.

En esta instancia toma relevancia la organización por medio de bloques quirúrgicos, ya que el punto de cruce se basa en estos con el objetivo de no destruir cadenas de procedimientos homogéneos ya creadas, mediante la selección de puntos aleatorios para el cruce. La figura muestra el esquema de trabajo del algoritmo para la ejecución del proceso de cruce.

Organismo Padre	Sala 1											Sala 2										Sala 3											
	Bq1			Bq2				Bq3		Bq4		Bq5					Bq6					Bq7		Bq8		Bq9				Bq10			
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24	P25	P26	P27	P28	P29	P30	P31	P32	

Organismo Madre	Sala 1											Sala 2										Sala 3											
	Bq1			Bq2				Bq3		Bq4		Bq5					Bq6					Bq7		Bq8		Bq9				Bq10			
	P33	P34	P35	P36	P37	P38	P39	P40	P41	P42	P43	P44	P45	P46	P47	P48	P49	P50	P51	P52	P53	P54	P55	P56	P57	P58	P59	P60	P61	P62	P63	P64	

FIGURA 7 Definición del punto de cruce

Paso 1:	Verificar Duplicados en pacientes
Paso 2:	Si hay duplicados sigue paso 3, si no hay duplicados se continúa paso 4.
Paso 3	Eliminación de duplicados, solo queda 1 en caso de pacientes repetidos.
Paso 4	Definir capacidad Sala 1
Paso 5	Selección aleatoria de UN bloque dentro del número de bloque del padre
Paso 6	Cálculo de la capacidad residual de la sala.
Paso 7	Selección aleatoria de UN bloque dentro del número de bloques de la madre Cálculo de la capacidad residual. Si excede, cambiar bloque, sino paso 8
Paso 8	Definir capacidad Sala 2 Selección aleatoria de UN bloque dentro del número de bloques del padre Cálculo de la capacidad residual de la sala Selección aleatoria de UN bloque dentro del número de bloques de la madre Cálculo de la capacidad residual. Si excede cambiar bloque, si no paso 9
Paso 9	Siguiente sala / Luego finalizar las salas, retorna a una segunda ronda

3.4.5 Descripción del proceso de Mutación

Para el proceso de mutación se diseñó un algoritmo de tres pasos que se relacionan a continuación:

- Paso 1 Seleccionar la sala con mayor capacidad residual
- Paso 2 Seleccionar la sala con la segunda mayor capacidad residual
- Paso 3 Intercambiar un bloque quirúrgico por sala seleccionado aleatoriamente.
- Paso 4 Recalcular

La tasa de Mutación se configuró en 5%.

3.3.6 Evaluación del Fitness, Estimación del Índice Sintético y criterio de Parada del algoritmo genético

Con los anteriores elementos, el aplicativo realizado en Matlab toma el valor de la solución multiobjetivo que entrega el algoritmo genético y para las cuales se han verificado las restricciones, con el objetivo de llevar a cabo el cálculo del Índice Sintético.

3.4.6.1 Estimación del factor de afectación del rendimiento de quirófanos

Como primer paso, se definen las variables a utilizar en la fórmula para el cálculo de z

$$z = \frac{(VrTiemporeferencia - VrTiemporesul)}{desvmedia} \quad z_r = \left(\frac{\left(TR_r - \sum_{d=1}^D T_d \right)}{\sqrt{\sum_{d=1}^D \sigma_d^2}} \right) ; \forall d \in D$$

Donde:

VrTiemporeferencia: Es el tiempo disponible para la franja (TF) en la sala respectiva. Por ejemplo: La franja F_r en la Sala 01 reporta una disponibilidad de 350 minutos en un día definido.

VrTiemporesul: Es la suma de los tiempos de los bloques de procedimientos (TB) arrojados por el algoritmo para la sala S. Por ejemplo: para la Sala 01, si se programaran 2 bloques, el bloque 1 y el bloque 2 así:

SALA 1	
BLOQUE 1	BLOQUE 2
Tiempo Procedim01	Tiempo Procedim03
Tiempo Procedim02	Tiempo Procedim04
	Tiempo Procedim05
Suma TiempoBloque1	Suma TiempoBloque 3
VrTiemporesul: SumaTiempoBloque1 + SumaTiempoBloque2	

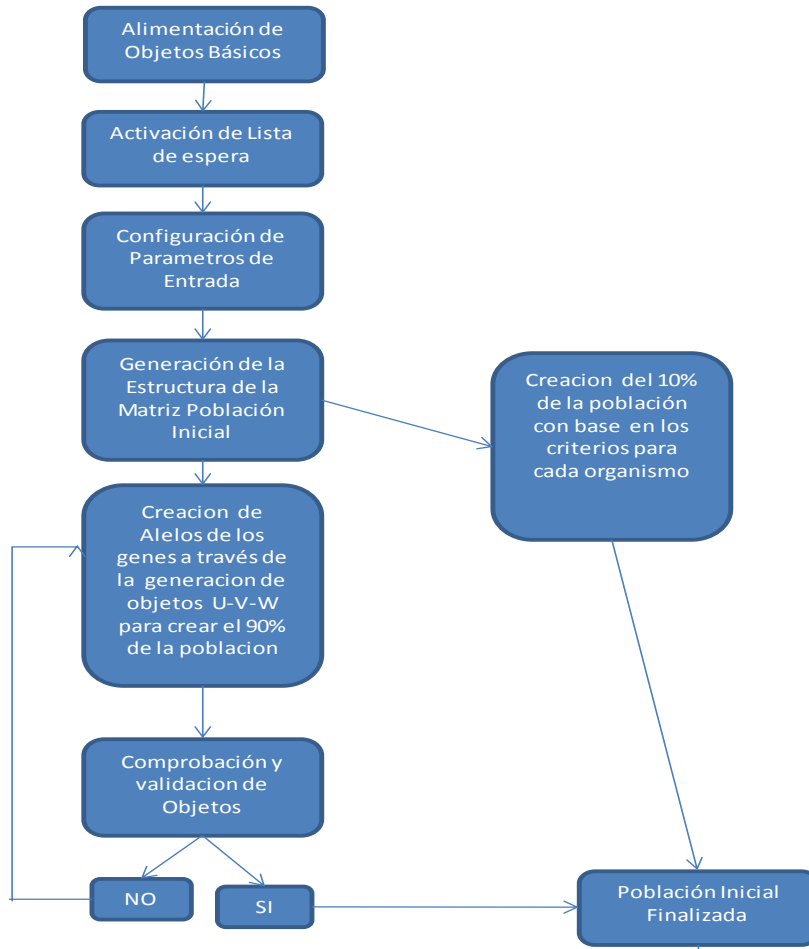
Desvmedia es la raíz cuadrada de la suma de las desviaciones al cuadrado

Se procedió a estimar el valor de z para cada sala, y a calcular el valor de la probabilidad para ese arreglo de procedimientos, para multiplicarla por el valor del fitness suministrado por el resultado del algoritmo. Con el valor del fitness calculado y ya ajustado, se estima el valor Total de la programación.

Calculado el Índice de mejor desempeño, el aplicativo genera una salida tipo XLS con la programación para las salas del conjunto de bloques ordenado acorde a la secuencia de ejecución, y los procedimientos a realizar dentro de estos bloques.

Una vez se hayan realizado 30 generaciones (*estimación basada en los análisis de desempeño mostrados en Coley, David A*) y no se muestre mejoría en el algoritmo que estima el Índice Sintético en un factor mayor al 1%, se detiene la ejecución.

3.5 DIAGRAMA DE FLUJO



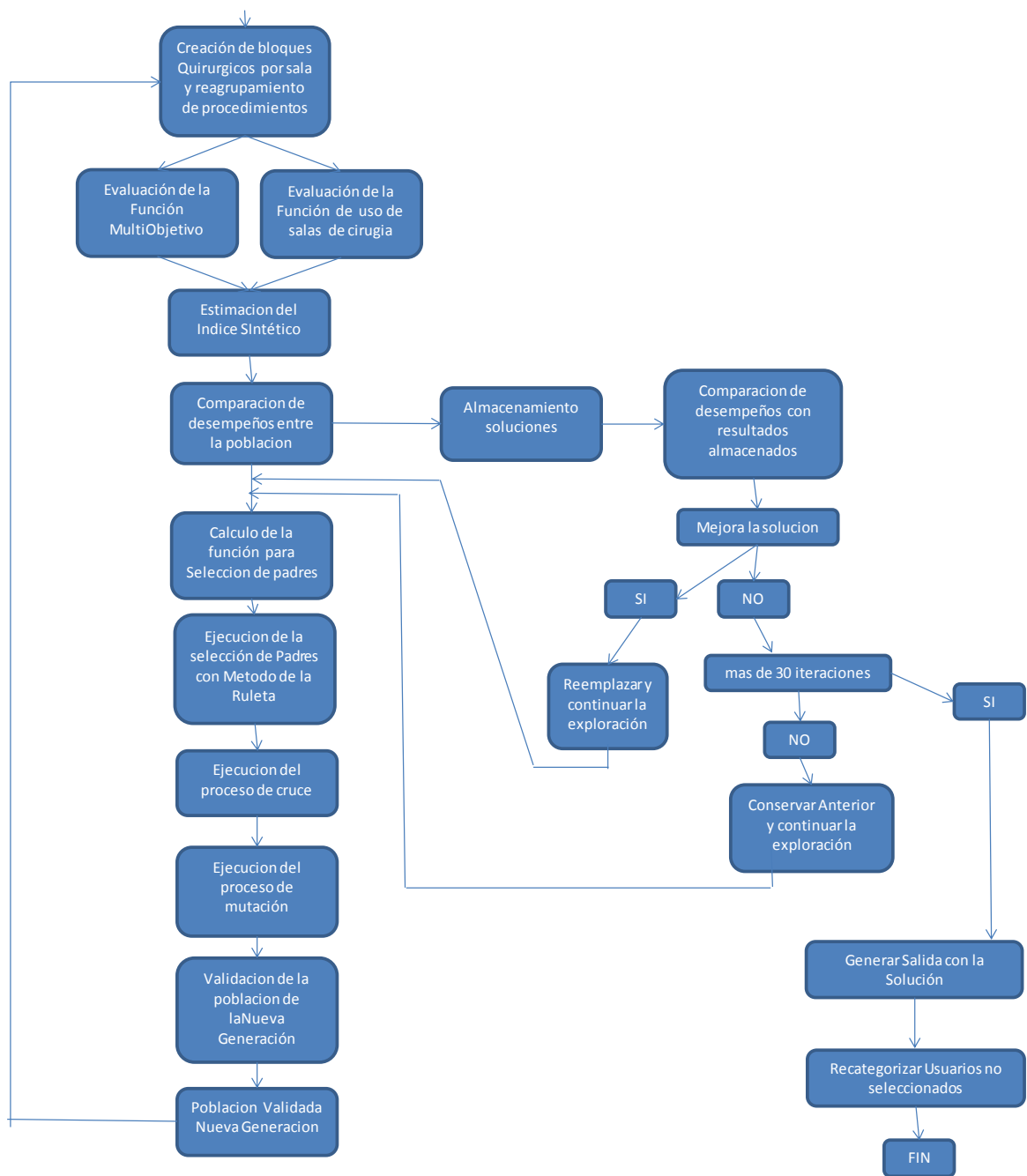


FIGURA 8 Diagrama de Flujo Algoritmo

4. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS OBTENIDOS

4.1 DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Para evaluar el desempeño del algoritmo, se evaluaron 20 días de programación correspondientes al período comprendido entre la segunda semana del mes de mayo y la segunda semana del mes de junio del año 2014 en la IPS Clínica Chicamocha SA. Con base en lo anterior, se compararon los resultados obtenidos para los respectivos índices sintéticos a través del modelo, contra la selección y programación realizada por la Clínica. El diseño del experimento consistió en un arreglo tipo antes después donde las variables a comparar fueron: A) la rentabilidad de la operación de salas de cirugía b) la calidad asistencial, utilizando para cada uno de los objetivos un peso específico W_u del 50% para cada uno, y donde la prueba estadística que se aplicó fue un Test de diferencia de medias para poblaciones independientes. Posteriormente se hicieron comparaciones realizando variaciones en la proporción de los pesos específicos W_u .

4.2 DATOS DE ENTRADA Y RESULTADOS

Para la fecha del experimento, se encontraban 124 pacientes en lista de espera, con los cuales se inició la ejecución de la programación para el “primer día”. En el modelo se consideró una lista tipo On-Line, ajustada con los valores de recategorización por tiempo de espera, con lo cual, se previó que ningún procedimiento se quede sin probabilidad de selección. Tal y como es sabido, la lista se ajustó acorde con la entrada diaria de pacientes, y con los valores de recategorización para los pacientes que ya estaban en lista y que en la iteración respectiva no fueron seleccionados, esto con el objetivo de que su probabilidad de selección aumente en la siguiente iteración.

Los resultados obtenidos se detallan a continuación:

Tabla 15 Salida en formato Excel.csv correspondiente a la programación de salas para el primer día de operación

Consec	Nombre	Cedula	Descripcion del Procedimiento	Cirujano	Sala Selecc	Tiempo de Inicio	Tiempo de Salida	Cod Proced	Rent Sala	UA Sala	Penal	Fitness Sala
1	B-U-O-I	7,52E+08	NEUROLISIS DE NERVIOS EN	C0014	Sala1	840	882	D0280				
2	F-I-C-P	1,21E+08	RESECCION DE TUMOR BENIGNO	C0017	Sala1	882	923	D0419	27,7%	51,3%	61,6%	0,36
3	Y-V-T-I	8,72E+08	RESECCION DE TUMOR BENIGNO	C0017	Sala1	923	964	D0419				
4	H-Y-I-T	5,15E+08	RESECCION DE GANGLION DE	C0029	Sala2	480	606	D0406				
5	S-C-N-V	9,81E+08	EXTRACCION DE CUERPO EXTRA	C0016	Sala2	606	696	D0479	26,9%	50,3%	100,0%	0,57
6	Z-N-I-V	1,55E+08	REDUCCION ABIERTA DE HERNIA	C0027	Sala2	696	941	D0326				
7	U-P-D-U	25118164	SALPINGECTOMIA Y DRENAJE	C0004	Sala3	840	924	D0231	8,2%	77,0%	100,0%	0,77
8	T-M-A-A	4,18E+08	SINOVECTOMIA DE CODO	C0041	Sala4	360	445	D0361				
9	Y-J-A-Q	8,57E+08	DRENAJE DE COLECCION	C0036	Sala4	445	565	D0026	20,6%	66,5%	100,0%	0,70
10	J-C-Z-L	2,77E+08	COLGAJO COMPUESTO A D	C0018	Sala5	360	441	D0006				
11	V-B-D-D	9,37E+08	LAPAROSCOPIA DIAGNOSTICA	C0013	Sala5	441	537	D0221	16,8%	90,3%	100,0%	0,92
12	N-L-S-D	8,01E+08	REDUCCION ABIERTA DE HERNIA	C0049	Sala5	537	615	D0323				
13	Y-N-N-S	7,91E+08	EXTRACCION EXTRACAPSULAR	C0028	Sala6	360	428	D0554				
14	H-G-U-A	8,19E+08	COLGAJO LOCAL DE PIEL	C0040	Sala6	428	496	D0143				
15	R-T-G-S	9,04E+08	REPARACION VIA ABIERTA	C0050	Sala6	496	533	D0425	17,6%	70,4%	97,10%	0,70
16	G-U-U-I	3,83E+08	CORRECCION DE MALFORMACION	C0035	Sala6	533	596	D0278				
17	U-N-D-B	5,35E+08	AMPUTACION O DESARTICULACION	C0052	Sala6	596	678	D0431				
18	F-S-G-P	6,75E+08	REDUCCION ABIERTA DE FRACTURA	C0054	Sala7	360	428	D0098				
19	R-D-E-E	2,29E+08	RESECCION DE TUMOR DE	C0057	Sala7	428	517	D0229				
20	S-Q-Q-R	4,16E+08	ESCISECCION PARCIAL DE FASCIA	C0025	Sala7	517	574	D0416	21,2%	59,2%	75,49%	0,47
21	M-S-S-T	1,64E+08	OTORRINO	C0039	Sala7	574	641	D0207				
22	Y-V-F-E	7,44E+08	REDUCCION ABIERTA CON	C0049	Sala7	641	702	D0350				
23	G-P-D-H	5,54E+08	Osteosintesis en clavícula	C0042	Sala8	360	405	D0442				
24	F-H-V-A	1,31E+08	EXTRACCION DE DISPOSITIVO	C0056	Sala8	405	443	D0312				
25	B-D-L-A	9,27E+08	REDUCCION CERRADA DE FRACTURA	C0056	Sala8	443	490	D0095				
26	P-M-F-O	5,32E+08	EXTRACCION DE DISPOSITIVO	C0049	Sala8	490	527	D0312	18,7%	60,4%	99,49%	0,63
27	Y-R-V-Y	3,2E+08	RESECCION DE LESION BENIGNa	C0023	Sala8	527	570	D0118				
28	U-F-B-T	7,74E+08	SALPINGO-OOFORRECTOMIA	C0057	Sala8	570	620	D0235				
29	U-D-V-S	1,1E+09	RECONSTRUCCION SECUNARIA	C0017	Sala8	620	665	D0391				

Indice Sintético 0,64

En la tabla 15 se muestra la programación de salas que se obtuvo mediante la aplicación del algoritmo de optimización ejecutado en Matlab para el “primer día de programación”. En la plantilla de salida, en formato Excel.csv (separado por comas) se pueden observar los nombres de los pacientes que van a ser intervenidos, el cirujano que va a llevar a cabo el procedimiento y el procedimiento, ordenados de acuerdo a la respectiva sala a la que fueron asignados. Adicionalmente también se especifican los datos de tarifas y costos utilizando sus respectivos valores promedio.

El tiempo esperado del procedimiento también se especifica, utilizando una notación de minutos respecto al punto de 00:00am. Esto quiere decir, por ejemplo, que el valor de 840 en el tiempo de inicio, significa 840 minutos luego de las 00:00am, que corresponde a 14 horas, equivalente al horario de las 2:00pm.

En la misma tabla, se pueden observar las valoraciones para cada uno de los objetivos, y la estimación del índice sintético. Es importante hacer referencia que los tiempos y costos corresponden a valores estimados por la programación a partir de datos estadísticos. Esto, como consecuencia de que los resultados se compararon con ejecuciones reales, en donde los datos de costos y tiempos fueron efectivamente los registrados.

En la tabla 16 se muestra la misma estructura de datos pero con los datos correspondientes a la programación real llevada a cabo por la institución prestadora de servicios de salud también para ese “primer día”. Los datos fueron extraídos directamente de las bases de datos, y con base a estos se estimó el índice sintético.

Al analizar las dos tablas, se pudo observar que pese a tener la misma base de pacientes, la ejecución realizada por el algoritmo, difiere respecto de lo programado por la clínica.

En la tabla 17 se muestra el consolidado de los resultados del índice sintético para las programaciones obtenidas por el algoritmo durante los 20 días, y aquellas ejecutadas por la clínica. En ella se puede observar que el desempeño del algoritmo produce variaciones favorables en el valor de los índices para las programaciones realizadas mediante el algoritmo de optimización.

Tabla 17 Resumen de los valores del índice sintético para las programaciones obtenidas por el algoritmo y las ejecutadas pro la IPS para la cuatro semanas

No. de programación	FECHA			FITNESS ÍNDICE SINTÉTICO		
	Año	Mes	Día	Solución generada mediante optimización	Ejecución de la Clínica	% de variación
1	2014	5	5	0,64	0,57	12,3%
2	2014	5	6	0,68	0,51	33,3%
3	2014	5	7	0,63	0,59	6,8%
4	2014	5	8	0,65	0,53	22,6%
5	2014	5	9	0,62	0,55	12,7%
6	2014	5	12	0,69	0,62	11,3%
7	2014	5	13	0,66	0,63	4,8%
8	2014	5	14	0,69	0,54	27,8%
9	2014	5	15	0,63	0,60	5,0%
10	2014	5	16	0,70	0,50	40,0%
11	2014	5	19	0,70	0,58	20,7%
12	2014	5	20	0,69	0,51	35,3%
13	2014	5	21	0,64	0,51	25,5%
14	2014	5	22	0,71	0,50	42,0%
15	2014	5	23	0,65	0,55	18,2%
16	2014	5	26	0,70	0,60	16,7%
17	2014	5	27	0,70	0,62	34,6%
18	2014	5	28	0,65	0,54	20,4%
19	2014	5	29	0,69	0,56	23,2%
20	2014	5	30	0,67	0,54	24,1%

Respecto de los usuarios de la lista original, luego de las programaciones sugeridas para las cuatro semanas, permanecieron sin haber sido seleccionados 18 pacientes, equivalentes al 14,5% de los usuarios. De igual forma, respecto de la ejecución realizada por la clínica, luego de las cuatro semanas, no habían sido seleccionados 26 pacientes, equivalentes al 21% de los usuarios.

Como mecanismo de validación estadística para la comprobación de diferencias entre los resultados del algoritmo, y los ejecutados con base en la programación de la clínica, se ejecutó una prueba de diferencia de medias para pruebas independientes para establecer si existen diferencias significativas entre los resultados arrojados por el algoritmo, y la ejecución de la clínica. Para esto se establecieron las siguientes hipótesis:

Ho: No existe diferencia significativa entre la media de los resultados del índice sintético arrojado por el algoritmo, respecto de la media del índice de los resultados ejecutados por la clínica.

H1: Existe diferencia significativa entre la media de los resultados del índice sintético arrojado por el algoritmo, respecto de la media del índice de los resultados ejecutados por la clínica.

Los resultados ejecutados en SPSS son los siguientes:

Tabla 18 Resultado Prueba de Hipótesis

Estadísticos de grupo					
	VAR00001 (agrupado)	N	Media	Desviación típ.	Error típ. de la media
VIndiceSint	Por IndiceSint	20	,6695	,02874	,00643
	Por ProgClin	20	,5525	,04011	,00897

Prueba de muestras independientes										
		Prueba de Levene para la igualdad de varianzas		Prueba T para la igualdad de medias						
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Error típ. de la diferencia	95% Intervalo de confianza para la diferencia	
									Inferior	Superior
VrIndice	Se han asumido varianzas iguales	1,845	,182	10,603	38	,000	,11700	,01103	,09466	,13934
	No se han asumido varianzas iguales			10,603	34,438	,000	,11700	,01103	,09459	,13941

Al evaluar el *Pvalor(nivel de significancia)*, este tiene un valor inferior a 0,05, por tanto, se acepta la hipótesis alternativa, que indica que si existen diferencias significativas entre las medias de los índices y por ende entre las programaciones obtenidas por el algoritmo y las ejecutadas por la clínica.

4.3 INCIDENCIA DE LA VARIACIÓN DE LOS PESOS WU

Para los resultados descritos en la sección anterior, se tomó como referencia que el tomador de decisiones asumía una ponderación equivalente a 50% para cada uno de los pesos de los objetivos, sin embargo, existe la posibilidad de evaluar el algoritmo ante variaciones de esas ponderaciones. A continuación se muestran los resultados con variaciones de dichas ponderaciones para el escenario de la primera semana, con factores de 60-40; 40-60; 70-30; 30-70:

Tabla 19 Incidencia de la variación de los pesos W_u

Fecha				Fitness Índice Sintético				
día de programación	año	mes	día	$W_{u1}=0,5;$ $W_{u2}= 0,5$	$W_{u1}=0,4;$ $W_{u2}= 0,6$	$W_{u1}= 0,6;$ $W_{u2}=0,4$	$W_{u1}= 0,3;$ $W_{u2}= 0,7$	$W_{u1}= 0,7;$ $W_{u2}=0,3$
1	2014	5	5	0,64	0,59	0,60	0,39	0,41
2	2014	5	6	0,68	0,65	0,65	0,42	0,44
3	2014	5	7	0,63	0,59	0,58	0,38	0,39
4	2014	5	8	0,65	0,57	0,58	0,40	0,43
5	2014	5	9	0,62	0,55	0,56	0,40	0,42

Como resultado del análisis de las variaciones a los pesos específicos, cabe destacar que cuando se varían los pesos entre objetivos, los valores que se obtienen para el índice quedan por debajo de su valor cuando se ponderan 50-50.

Cuando se intercambian las mismas proporciones entre objetivos, (es decir 60-40 y luego 40-60), los valores obtenidos para el índice en uno u otro caso si bien son casi idénticos, no significan lo mismo. Esto quiere decir, por ejemplo, que el valor de 0,59 para el índice en el caso de $W_{u1}= 0,4$ y $W_{u2}=0,6$ favorece la utilidad financiera más que la asistencial y el valor de 0,60 del índice para el caso de $W_{u1}= 0,6$ y $W_{u2}=0,4$ favorece la utilidad asistencial más que la financiera.

Para casos donde la brecha entre los pesos se hace más amplia (70-30; 30-70), se pudo observar que el índice muestra un deterioro importante, atribuible al hecho de que ya no sería significativo el aporte del objetivo con el peso más bajo, lo que lleva al tomador de decisiones a tener una visión clara de los resultados que puede obtener cuando se desee establecer políticas de satisfacción al usuario en forma efectiva.

CONCLUSIONES

- En este trabajo se pudo validar la utilidad de los algoritmos genéticos para dar resolución al problema de investigación, categorizado como de alta complejidad debido a su naturaleza combinatoria. Los resultados para los dos objetivos planteados fueron significativamente mejores ya que en todos los casos el Índice sintético estimado para las programaciones mostró desempeños superiores a la recalificación histórica de las programaciones, con un incremento promedio del 15,86%, inclusive, en los casos donde no se hallaron valores superiores para la rentabilidad financiera de referencia, los datos de calidad asistencial registraron incrementos sobresalientes.
- Dentro de las alternativas para trabajos futuros debe incluirse una revisión a la estructura de la programación en aras de mejorar su desempeño en los tiempos de cómputo para poblaciones superiores a 200 organismos.
- Se puede inferir que la capacidad del aplicativo para realizar el proceso de estimación del índice y de entregar una solución real y factible, es un incentivo para su implementación en el sector salud.
- La prueba de diferencia de medias aplicada para evaluar diferencias significativas permitió establecer la validez del modelo y la efectividad del aplicativo.
- Se pudo constatar una diferencia significativa en los resultados obtenidos por el Índice Sintético ante variaciones en las proporciones de los factores de ponderación, cuando estas superan una razón de 70-30 entre la mayor y la menor, lo que demanda la definición de políticas claras por parte del tomador de decisiones.
- Como posibles líneas de trabajo a futuro se puede profundizar sobre el análisis de sensibilidad de las variaciones de las ponderaciones dadas a cada uno de los objetivos, o bien, complementar el modelo de uso de salas incluyendo los procesos de urgencias por medio de modelos estocásticos. También se pueden originar trabajos sobre el impacto que tendría la integración de restricciones de uso para las UCI's en el uso de salas de cirugía.

BIBLIOGRAFÍA

- ABIDO, M. y ELAZOUNI, A. Multiobjective evolutionary finance-based scheduling : the entire projects' portfolio Multiobjective finance-based scheduling Cash flow model. En: Nottingham University Press. 2010. 10 p.
- ADAN, Ivo, BEKKERS, Jos, ...et al. Patient mix optimization and stochastic resource requirements: A case study in cardiothoracic surgery planning. En: Health Care Management Science. Vol. 12. 2, 2009. pp 129-141
- ALEMI, Farrokh y GUSTAFSON, David H. Decision Analysis for Healthcare managers. Chicago, Il., Health Administration Press, 2010. 369 p.
- ALFONSO, Hugo, et al. Algoritmos metaheurísticos para optimización y aplicación a problemas NP completos. Universidad Nacional de la Pampa. pp. 5
- APELLA, Ignacio. Estimación de la función de demanda de Salud. El caso argentino. En: Nuevos Documentos Cedes. Vol. 59. 2009. 16 p.
- ARENAS, M. et al., Analysis via goal programming of the minimum achievable stay in surgical waiting lists. En: Journal of the Operational Research Society. Vol. 53. 2002 pp. 387 – 396.
- ARINGHIERI, Roberto, et al. A two level metaheuristic for the operating room scheduling and assignment problem. En: Computers & Operations Research. Vol: 54. 2015. pp. 21-34
- AZIMI, Zahra Najj. Comparison of metaheuristic algorithms for Examination Timetabling Problem. En: Journal of Applied Mathematics and Computing. Vol. 16. 1-2, 2014. pp. 337-354
- BAESLER, F. y SEPÚLVEDA, J. Multi-objective simulation optimization for a cancer treatment center. En: Proceedings of the Winter Simulation Conference. 2001 pp. 1405 – 1411
- BALLARD, Sarah M. y KUHL, Michael E. The use of simulation to determine maximum Capacity in the surgical suite operating room. En: Winter Simulation Conference, 2006. Pp. 433-438
- BARRIOS, Mariela Forrellat. Calidad en los servicios de salud: Un reto ineludible. En: Revista Cubana Hematología, Inmunología y Hemoterapia. Vol. 30. 2, 2014. pp. 179-183

- BEAUSOLEIL, Ricardo P. "Filter-andFan" aplicado a problemas de mochila multi-dimensional 2-objetivo. Instituto de Cibernética Matemática y Física. Departamento de Matemática interdisciplinaria. 8 p.
- BEJARANO, Mónica. Evaluación cuantitativa de la eficiencia en las salas de cirugía. En: Rev. Colomb. Vol. 26. 2011. pp. 273-284
- BERGAMASCHI, D. CIGOLINI, R. et al. Order review and release strategies in a job shop environment: a review and a classification. En: International Journal of Production Research. Vol. 35 No. 2, 1997. p. 399-420
- BILGIN, Burak y DEMEESTER, Peter. One hyper-heuristic approach to two timetabling problems in health care. En: Journal of Heuristics. Vol. 18. 3, 2012. pp. 401-434
- BLUM, Christian y ROLI, Andrea. Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison. En: ACM Computing Surveys. Vol. 35. 3, 2003. pp. 268-308
- BRANDEAU, Margaret L. et al., Operations Research and Health Care a Handbook of methods and applications. New York, Kluwer Academic Publishers, 2004. 882 p.
- BRANKE, Jürgen, et al., Multiobjective Optimization. Berlin: Springer Science+Business, 2008. 481 p.
- CAPPANERA, Paola, et al. Comparing resource balancing criteria in master surgical scheduling: A combined optimization-simulation approach. En: International Journal of Production Economics. Vol. 158. 2014. pp. 179-196
- CARDOEN, Brecht, Demeulemeester, Belien.J, Optimizing a multiple objective surgical case scheduling problem. En: Dtew-Kbi_0625,1-38.
- CARDOEN et al., En: En: Jiménez, Angela M. y Velásco, Nubia y Amaya, Ciro. Estrategias de programación de salas de cirugía: Un caso de aplicación en un hospital de Bogotá. En: Los Cuadernos de PYLO, 2008. 17 p.
- CARDOEN, Brecht, et al., Operating room planning and scheduling: A literature review. En: European Journal of Operational Research. Vol. 201. 3, 2010. pp. 921-932
- CHAN, Cw., y GREEN, Lv. Handbook of Healthcare Operations Management: Methods and Applications. New York, Springer Science + Business, 2013. 541 p

- CHANDOUL, Wided. Evolutionary Approach for Multi-Objective Scheduling in surgical unit. Conference Francophone Gestion et Ingénierie des Systemes Hospitaliers (GISECH 2012) Agosto 2012, Quebec, Canada.
- CHEN, Chung-Kuang. LIN, Cecilia, et al. A study of operating room scheduling that integrates multiple quantitative and qualitative objectives. En: The journal of nursing research: JNR. Vol. 18. 1, 2010. pp. 62-74
- COELLO, Carlos A. A tutorial on Multi-objective optimization using metaheuristics. En: Monografías del Seminario Matemático García de Galdeano nn, 1-20 (2009). 20 p.
- _____, et al., Applications of Multi-Objective Evolutionary Algorithms. New Jersey: World Scientific. 2004, 791 p.
- _____, et al., Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems (Genetic Algorithms and Evolutionary Computation). New York, 2002. 610 p.
- COLSON, Benoît, Marcotte, Patrice, Savard, Gilles. An overview of bilevel optimization. En Annals of Operations Research, Vol.153, 2007, pp 235-256
- CONGRESO DE COLOMBIA. Ley 100 de 1993. 189 p.
- CORREA ESPINAL, Alexander Alberto, et al. Secuenciación de operaciones para configuraciones de planta tipo flexible Job Shop: Estado del arte. En: Avances en Sistemas en informática, Vol. 5 No. 3, 2008. pp. 151 - 161
- CORREA FLÓREZ, Carlos Adrián. BOLAÑOS, Ricardo Andrés. MOLINA CABRERA, Alexander. Algoritmo multiobjetivo NSGA-II aplicado al problema de la mochila. En: Scientia et Technica. No. 39, 2008. pp. 206-211
- DE LA CRUZ, Jair J. MENDOZA, Adriana. et al. Análisis comparativo de las aproximaciones heurísticas Ant-Q , recocido simulado y búsqueda tabú en la solución del problema del agente viajero. En: Ingeniería y Desarrollo. Vol. 14. 2003. pp. 141-157
- DENTON, B. T. MILLER, A. J. et al. Optimal Allocation of Surgery Blocks to Operating Rooms Under Uncertainty. En: Operations Research. Vol. 58 No. 4, 2010. pp. 802-816
- DUQUE ROLDÁN, María Isabel, GÓMEZ MONTOYA, Luis Fernando y OSORIO AGUDELO, Jair Albeiro. Análisis de los sistemas de costos utilizados en las entidades del sector salud en Colombia y su utilidad para la toma de decisiones. En: Revista del Instituto Internacional de Costos. No. 5, 2009. pp. 495-525

- EICHFELDER, G. Multiobjective bilevel optimization. En Math. Program., Ser. A (2010) 123:419–449
- ELIZONDO, Echenique y AGUIRREGOITIA, Díaz. Organización y gestión hospitalaria hoy : Servicio de cirugía. En: Osasunaz. Vol. 5, 2003 pp. 191-236
- ERLEBACH, Thomas. KELLERER, Hans. PFERSCHY, Ulrich. Approximating Multiobjective Knapsack Problems. En: Management Science 2002 Informs. Vol. 48 No. 12, December 2001 pp. 1603-1612
- FEI, H. CHU, C. y MESKENS, N.. Solving a tactical operating room planning problem by a column-generation-based heuristic procedure with four criteria. En: Annals of Operations Research. Vol. 166. 1, 2008. pp. 91-108
- FÜGENER, Andreas. HANS, Erwin W. et al. Master surgery scheduling with consideration of multiple downstream units. En: European Journal of Operational Research. Vol. 239. 1, 2014. pp. 227-236
- GAPENSKI, Louis C. Healthcare finance: An introduction to accounting and financial management. Chicago, Il. Foundation of the American College of Healthcare, 2008. 679 p.
- GARDEYA, V.B. DEANE, R.H. Scheduling research in multiple resource constrained job shops: a review and critique. En: International Journal of Production Research. Vol. 34 No. 8, 1996. pp. 2077-2097
- GETZEN, Thomas E. Health Economics and Financing. 5 Ed. New Jersey, John Siley & Sons. 2013. 499 p.
- GINSBURG, Jack, et al. Controlling health care costs while promoting the best possible health outcomes. En: American College of Pshysicians. (2009) p. 57
- GORDON, Toby. PAUL, Sharon, et al. Surgical unit time utilization review. En: Juornal of Medical Systems. Vol. 12. No. 3, 1988
- GUTIÉRREZ, Víctor Hugo, ZAPATA, Mauricio, et al., Maximizing the profitability of forestry projects under the Clean Development Mechanism using a forest management optimization model. En: Forest Ecology and Management. Vol 226. 1-3, 2006. pp.341-350
- HALL, Randolph. Handbook of Healthcare System Scheduling. New York, Springer Science+Business Media, 2012. 336 p.
- HAN, Jee Hoon, AHN, Yu Chan y LEE, In Beum. A multi-objective optimization model for sustainable electricity generation and CO₂ mitigation (EGCM)

- infrastructure design considering economic profit and financial risk. En: Applied Energy. Vol. 95. 2012. pp. 186-195
- HILLIER, Frederick S. LIEBERMAN, Gerald J. Introducción a la Investigación de Operaciones. 9 ed. México: Mc Graw Hill, 2010. 1010 p.
- HUTZSCHENREUTER, A.K., BOSMAN, P.A. y POUTRÉ, H. Evolutionary Multiobjective Optimization for Dynamic Hospital Resource Management. En: M. Ehrgott et al. EM 2009, LNCS 5467, pp. 320-334.
- ISHIBUCHI, Hisao. AKEDO, Naoya. NOJIMA, Yusuke. Behavior of Multi-Objective Evolutionary Algorithms on Many-Objective Knapsack Problems. En: IEEE Transactions on evolutionary computation. Vol. 19 No. 2, 2015. pp. 264 - 283
- JEBALI, Aïda. HADJ Alouane, ATIDEL B. LADET, Pierre. Operating rooms scheduling. En: Science Direct No. 99, 2006 pp. 52-62
- JERIĆ, Silvija Vlah y FIGUEIRA, José Rui. Multi-objective scheduling and a resource allocation problem in hospitals. En: Journal of Scheduling. Vol. 15. 5, 2012. pp. 513-535
- JIMÉNEZ, A. M. GUERRERO, J., et al. Optimización de los recursos en los hospitales: revisión de la literatura sobre logística hospitalaria. (2007) 13 p.
- _____. et al., Estrategias de programación de salas de cirugía: Un caso de aplicación en un hospital de Bogotá. En: Los cuadernos de PYLO. 2008. 17
- JOINT COMMISSION INTERNATIONAL, Department of publications, Estándares para la acreditación de Hospitales de la Joint Commission International p.
- JONES, Peter. Introduction to hospitality operations. An indispensable guide to the industry. 2 ed. London, Cengage Learning EMEA, 2002. 317 p.
- _____. Introduction to hospitality operations. An indispensable guide to the industry. Introduction to Hospitality operations: An indispensable guide to the industry. South-Western Cengage Learning, 2002. 317 p.
- _____, PIZAM. Handbook of Hospitality operations and IT. En: El Sevier, 2008. pp. 269-294
- KOKSALMIS, Emrah, et al. How to Schedule Surgical Operations into Operating Rooms? An Application in Turkey. En: Industrial and Systems Engineering research conference. (2014) 10 p.

- KONAK, Abdullah. COIT, David W. SMITH, Alice E. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. En: Reliability Engineering and System Safety No. 91, 2006. pp. 992-1007
- LAMIRI, M., et al., A stochastic model for operating rooms planning with elective and emergency surgery demands. En: Industrial Engineering and Computer Sciences division. 2005. 24p.
- LAWLER, E.L. Knapsack-like scheduling problems, the Moore-Hodgson algorithm and the 'tower of sets' property. En: Mathematical and Computing Modelling. Vol. 20, No. 2, 1994. pp- 91-106.
- Li,Q, Multiobjective Operating Room Planning and scheduling. (2010)En: <http://gradworks.umi.com / 34/32/432430.html>
- LIN, Gui-Hua. XHANG, Dali y LIANG, Yan-Chao. Stochastic multiobjective problems with complementarity constraints and applications in healthcare management. En: European Journal of Operational Research No. 226, 2013. pp. 461-470
- LÓPEZ MONTALEZA, Ginger. Método Dupont. En: Universidad Politécnica Salesiana. p. 5
- LOSADA OTÁLORA, Mauricio y RODRÍGUEZ OREJUELA, Augusto Rodríguez. Calidad del servicio de salud: una revisión a la literatura desde la perspectiva del Marketing. En: Cuadernos de Administración. Vol. 20. 34, 2007. pp. 237-258.
- MARQUES, Inês, et al. Scheduling elective surgeries in a Portuguese hospital using a genetic heuristic. En: Operations Research for Health Care. Vol. 3. 2, 2014. pp. 59-72
- MEJÍA MEJÍA, Aurelio. Evaluación económica de programas y servicios de salud. En: Rev. Gerencia, Política y Salud. Vol. 7 No. 15, 2008. pp. 91-113
- MINISTERIO DE HACIENDA, Colombia. Presupuesto General de la Nación 2014
- MINISTERIO DE PROTECCION SOCIAL, Dirección General de Calidad de Servicios del Ministerio de la Protección Social. Manual de Acreditación en Salud, Ambulatorio y Hospitalario. Ver3.2011. Bogotá, Colombia.
- MORAGA, Reinaldo J. WHITEHOUSE, Gary E. y DEPUY, Gail W. Meta-Raps: Un Enfoque De Solución Eficaz Para Problemas Combinatorios. En: Revista Ingeniería Industrial. Vol. 2. 1, 2003. pp. 5-18

- MORAIS, Márcia de Fátima, et al. Hybrid flow shop scheduling problems involving setup considerations: a literature review and analysis. En: International Journal of Industrial engineering. Vol. 20. 11-12, 2013. pp. 614-630
- MORILLO, Daniel, MORENO, Luis y DÍAZ, Javier. Metodologías analíticas y heurísticas para la solución del Problema de Programación de Tareas con Recursos Restringidos (RCPSP): una revisión. Parte 2. En: Ingeniería y Ciencia. Vol. 10. 20, 2014. pp. 203-227
- OCDE, European Comision, Handbook on Constructing Composite Indicators. Methodology and user guide. 2008.162p
- ¹ PEREZ.F, Blancas.F, Gonzalez.M,et.al, Análisis, diseño y comparación de indicadores sintéticos.
- OZCAN, Yasar A. Quantitative methods in health care management: Techniques and applications. San Francisco, John Wiley & Sons, Inc. 2009. 467 p.
- PARRA RIVEROS, Helien. Metodología para la evaluación de la eficiencia integral en servicios de salud en instituciones públicas prestadoras de servicios de salud (IPS E.S.E.).
- PEASE.A, Peker.A, The Hospital Game: Optimizing Surgery schedules to save resources, and to save lives.En: SAS Global Forum 2013, 154(2013), 1-14.
- PEÑUELA MENESES, César Augusto. GRANADA ECHEVERRI, Mauricio. Optimización Multiobjetivo usando un algoritmo genético y un operador elitista basado en un ordenamiento no-dominado (Nsga-ii). En: Scientia Et
- PEREZ.F, Blancas.F, Gonzalez.M, et.al, Análisis, diseño y comparación de indicadores sintéticos. Technica, Vol. XIII No. 35, 2007. pp. 175-180
- PHAM, Dinh-Nguyen y KLINKERT, Andreas. Surgical case scheduling as a generalized job shop scheduling problem. En: European Journal of Operational Research. Vol. 185. 3, 2008. pp. 1011-1025
- PRADENAS ROJAS, Lorena. VIDAL.PARADA y MELGAREJO. An algorithm to surgery scheduling and surgeons assignment in a public hospital. En: Revista del Instituto Chileno de Investigación Operativa. Vol. 2. 2012. pp. 20-29
- PRADENAS ROJAS, Lorena. Matamala, Exequiel. Una formulación matemática y de solución para programar cirugías con restricciones de recursos humanos en el hospital público. En: Revista Chilena de Ingeniería. Vol. 20. 2012. pp. 230-241

- PRASANTH, TP. Academic writing for accounting and finance students. En: International Journal of Business Innovation and Research.2012.p.3-23
- PROFAMILIA - Ministerio de Protección Social, Colombia. Afiliación, percepción y uso de servicios del sistema general de seguridad social en salud 18. p. 18
En: Encuesta Nacional de Demografía y Salud (ENDS) 2010. pp. 339-439
- RAFTERY, J. Methodological limitations of cost-effectiveness analysis in health care: implications for decision making and service provision. En: Journal of evaluation in clinical practice. Vol. 5. 2, 1999. pp. 361-366
- RAYWARD-Smith, V. J. OSMAN, I. H. et al. Modern Heuristic Search Methods. New Jersey: John Wiley & Sons, Ltd., 1996. 314 p.
- REVECO SEPÚLVEDA, Luis Roberto. VALLEJOS VALLEJOS, Carlos Alberto. Impacto de dos métodos alternativos de asignación de costos indirectos estructurales de hospitales públicos chilenos en el costo final de producción de servicios sanitarios. En: Value in Health Regional Issues. Vol. 1. 2, 2012. pp. 142-149
- RUIZ, Santiago. CASTRILLON, Omar D. y SARACHE, William A. Una metodología multiobjetivo para optimizar un ambiente Job Shop. En: Información Tecnológica. Vol. 23 No. 1, 2012. pp. 35-36
- SALLENAVE, Jean Paul. La gerencia Integral. Bogotá: Norma, 1995, p. 62
- SEGURA.O, Lozano.E, et.al. Construcción de un Indicador Sintético para medir diferencias en la eficiencia hospitalaria por servicios. En: <http://www.cocmed.sld.cu/no81/ind81.htm>
- SERKAN, Kaya. NILGUN, Figlali. Multiobjective flexible job shop scheduling
- SERRA.V, SOLANS.M, ESPALLARGES.M, Eficiencia en la utilización de los bloques quirúrgicos. Definición de indicadores Madrid: Plan de Calidad para el Sistema Nacional de Salud. Ministerio de Ciencia e Innovación. Barcelona: Agència d'Informació, Avaluació i Qualitat en Salut, 2011.- 105 p; 24 cmproblems. En: Sigma No. 31, 2013. pp. 605 - 623
- SOARES, Marcio M. y VIEIRA, Guilherme E. A new multi-objective optimization method for master production scheduling problems based on genetic algorithm. En: International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Vol. 41. 5-6, 2009. pp. 549-567
- SOTO, Daniel. SOTO, Wilson. PINZON, Yoan. Algoritmo de optimización de Colonia de hormigas multiobjetivo aplicado al problema de la mochila multidimensional. En: Programación Matemática y Software. Vol 3 No. 2, 2011. pp. 20-31

- STEINER, Maria Teresinha Arns. Multi-objective optimization in partitioning the healthcare system of Parana State in Brazil. En: Omega. Vol. 52. 2014. Pp. 53-64
- TAN, Siok Swan, et al. Comparing methodologies for the allocation of overhead and capital costs to hospital services. En: Value in Health. Vol. 12. 4, 2009. pp. 530-535
- TORRES Hinestroza, Arley, et al. Metodología de costos para instituciones prestadoras de servicios de salud: aplicación de los Grupos Relacionados por el Diagnóstico – GRD. En: El hombre y la máquina. Univ. Autónoma de Occidente. Vol. 40. 2012. pp. 31-43
- VAN OOSTRUM, J. M. et al. A model for generating master surgical schedules to allow cyclic scheduling in operating room departments. En: Department of Applied Mathematics Faculty of EEMCS. (2006)
- VELÁSQUEZ-RESTREPO, Paula Andrea. RODRÍGUEZ-QUINTERO, Alma Karina y JAÉN-POSADA, Juan Sebastián. Aproximación metodológica a la planificación y a la programación de las salas de cirugía: una revisión de la literatura. En: Rev. Gerenc. Polit. Salud. Vol 12. 24, 2012.pp.249-266
- YANG, Xin-She. Introduction to mathematical optimization: From linear programming to metaheuristics. 1 Ed. Great Abington: Cambridge International Science Publishing, 2008. 161 p.
- YUNUS, Demir, S. KÜRSAT Isleyen. Evaluation of mathematical models for flexible job-shop scheduling problems. En: Applied Mathematical Modelling No. 37, 2013 pp. 977-988
- ZELMAN, William N., MCCUE, Michael J. Financial Management of Health Care Organizations: an introduction to fundamental tools concepts and applications. 2 ed. Malden, Blackwell Publishing, 2003. 538 pp.
- ZHANG, Q. MANIER, H. y MANIER, M. A. A genetic algorithm with tabu search procedure for flexible job shop scheduling with transportation constraints and bounded processing times. En: Computers and Operations Research. Vol. 39. 7, 2012. pp. 1713-1723
- ZHOU, Aimin, et al., Multiobjective evolutionary algorithms: A survey of the state of the art. En: Swarm and Evolutionary Computation. Vol. 1. 1, 2011. pp. 32-49
- ZWEIFEL, Peter. et al., Health Economics. Berlin, Springer-Verlag, 2009. 550 p.
- ZYKINA, A.V. A Lexicographic Optimization Algorithm.En: Automation and Remote Control, Vol. 65, No. 3, 2004, pp. 363-368

