

Trabajo de grado en modalidad de aplicación

Diseño de un aplicativo para la programación de salas de cirugía teniendo en cuenta el impacto de la reprogramación

Angela Moreno^{a,c}, Alejandro Rivera^{a,c}, Camilo Zuleta^{a,c},

Gabriel Zambrano^{b,c}, Rabie Nait-Abdallah^{b,c}

^a *Estudiante de Ingeniería Industrial*

^b *Profesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial*

^c *Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia*

Abstract

This project proposes a resolution strategy for the Operating Room Scheduling Problem (ORS) based on a case study of a fourth level clinic in Bogota, Colombia. Currently, the critical operational decisions within the ORS are: the estimation of surgical times and the assignment of surgeries by periods, rooms and days. These decisions are made according to the clinical programmers' knowledge and surgeons' experience, which can lead to overtime and a low proportion of OR utilization.

The aim of this process is to design an application that determines the operational programming of the surgery rooms of the clinic, seeking to maximize its use, considering the impact of rescheduled surgeries.

In accordance with the requirements of the clinic, an application was developed in Microsoft Excel Visual Basic. This design complies with CRISP-DM and RUP standards on data management and software engineering respectively.

The development of this application was divided into four phases: determination of factors, statistical analysis, design and implementation of the application and evaluation. In the first phase, the input data that structures the application was determined by the Factor Weighting Method. In the second phase, according to the database of surgical times structured by the clinic, a statistical analysis was performed and allowed to standardize the surgical times by classifying them by surgeon and type of procedure.

In the third phase, a Linear Programming Model (LPM) was established as a tool to identify the key parameters, variables and constraints. However, due to the nature of this problem and to a stress test performed on the model, it was proved insufficient. Therefore, a solution methodology was proposed, an Earliest Due Date (EDD) scheduling rule similar to the assignment method currently performed in the clinic. Besides, a Genetic Algorithm (GA) was developed to improve the initial solution.

In the evaluation and validation phase, 10 solution cases were raised, with different restrictions and solution methodologies. This allowed to make a comparison between the programming indicators of the different cases and to choose the most convenient one for the clinic. Additionally, in this phase a simulator was implemented which allows the analysis of the behavior in the execution of the surgery programming obtained in each scenario. The simulator assigns random surgical times from the clinic historical database.

Finally, a software that programs surgical room allocation was developed. It considers the following constraints: surgeon's schedule, specialties that can be operated in each room, maximum utilization, the complete length of each surgery effectively assigned, and that every procedure must be scheduled only once or otherwise it will return to the queue of surgeries that remain to be programmed. Throughout the project, the

most complete solution in terms of programming and simulation is the genetic algorithm with schedule constraint for each surgeon, but without assigning the surgeon to a specific OR.

Keywords: operating room scheduling, software application, specialties, data analysis, optimization, simulation, genetic algorithm.

1. Justificación y planteamiento del problema

En Colombia, las instituciones prestadoras de salud (IPS) son clasificadas en cuatro categorías según sus responsabilidades por niveles de complejidad: Nivel I, II, III y IV. Las clínicas de cuarto nivel, a diferencia de los otros tres niveles, cuentan con la participación de médicos especialistas y ofrecen atención de patologías de tipo catastrófico. Estas patologías representan una alta complejidad técnica en su manejo, alto costo, poca ocurrencia y bajo costo de efectividad. En este tipo de clínicas se desarrollan procedimientos quirúrgicos tales como trasplantes renales, cirugías cardíacas, neurocirugías, tratamiento quirúrgico de enfermedades congénitas, entre otras (Ministerio de Salud, 1994).

La programación de salas de cirugías para centros de salud de cuarto nivel es un caso particular que merece ser analizado detenidamente. La sección de cirugías de un hospital es una de las áreas más costosas, pues en ella incurre aproximadamente el 33% del presupuesto anual proyectado del centro médico (Meskens, Duvivier, & Hanset, 2012). Adicionalmente, este servicio representa un porcentaje superior al 40% de los ingresos anuales de un centro hospitalario (Denton, Viapiano, & Vogl, 2007). De esta manera, se evidencia que en esta área vale la pena hacer un estudio detallado sobre posibles oportunidades de mejora que pueden ser implementadas, cumpliendo con la promesa de servicio con los pacientes.

La planeación y programación de salas de cirugía ha sido ampliamente investigada y desarrollada a lo largo de los años (Cardoen, Demeulemeester, & Beliën, 2009). Por su parte, este problema ha sido abarcado de acuerdo con tres niveles diferentes de decisiones. En primer lugar, están las decisiones estratégicas (planteadas a largo plazo) a través de las cuales se determinan las especialidades, cantidad de salas de cirugías y tipo de equipos a utilizar en cada procedimiento quirúrgico. En el segundo nivel de decisión se requieren decisiones tácticas (planteadas a mediano plazo) tales como la capacidad de las salas de cirugías de acuerdo a cada tipo de especialidad (dentro de la literatura esta decisión es conocida como la asignación de salas por bloques) y por último se deben considerar decisiones operacionales (planteadas a corto plazo) que permiten la asignación puntual de los cirujanos, pacientes y las salas quirúrgicas de acuerdo a los bloques definidos previamente (Rafaliya, N, Fazle Baki, & Chaouch, 2015).

1.1. Descripción actual del proceso de programación de cirugías

Este proyecto será desarrollado en una clínica de cuarto nivel en Colombia, tomada como caso de estudio, donde se realiza la programación de cirugías a partir del esquema de niveles de decisión mencionado anteriormente. En la Ilustración 1 se describen cronológicamente las actividades efectuadas por la clínica a nivel estratégico, táctico y operacional.

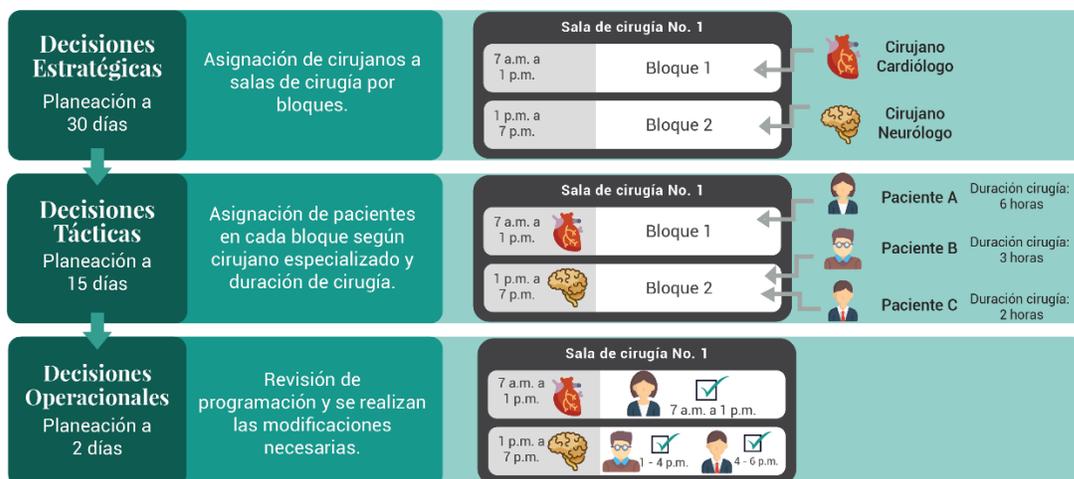


Ilustración 1. Niveles de decisión de la programación de salas

A nivel estratégico, esta institución asigna cirujanos y especialistas a salas específicas por lo menos con un mes de anterioridad. Adicionalmente, determina la cantidad de salas disponibles para cirugías de urgencias y distintas especialidades, dividiendo los horarios de cada sala en dos bloques de 6 horas cada uno (de 7 am a 1 pm y de 1 pm a 7 pm).

Dentro de la planeación táctica, la clínica asigna las cirugías de los pacientes en los bloques previamente definidos, para un horizonte de 15 días. Estas cirugías deben programarse en los espacios que fueron establecidos para cada cirujano y su respectiva sala. En cada bloque se asigna el mayor número de cirugías posible, de acuerdo con el tiempo quirúrgico, tipo de paciente y especialidad de cada caso. Una cirugía debe realizarse en su totalidad para ser asignable dentro de un bloque.

Finalmente, las decisiones operativas consisten en revisar la programación quincenal y modificarla, de ser necesario, con el fin de obtener la programación definitiva para el día siguiente. En este caso, el funcionario encargado de esta tarea debe considerar dos fenómenos. Primero, la replanificación de cirugías, situación que se presenta cuando el paciente solicita el cambio de la fecha de su cirugía o éste no cumple con los requisitos mínimos para realizar su procedimiento quirúrgico. Segundo, la reprogramación de cirugías que existe debido a algún factor interno de la clínica que implique programarla nuevamente en el futuro. Es importante resaltar que en este trabajo de grado se analizarán exclusivamente las cirugías de tipo electivo, las cuales son programadas con anterioridad y no son consideradas como cirugías de emergencia o urgencia.

1.2. Planteamiento del problema

Se ha determinado que el campo de acción de este proyecto será relativo a la toma de decisiones de tipo operativo. Dentro de estas decisiones existen algunas que presentan oportunidades de mejora, puesto que han sido factores críticos mencionados por los directivos y algunos funcionarios involucrados en este proceso. A continuación, se describen estas decisiones.

(1) Los tiempos quirúrgicos establecidos para las cirugías dependen del cirujano, tipo de paciente y especialidad. Si se trata de un especialista que pertenece al equipo de cirujanos de la clínica se programa el tiempo quirúrgico promedio que tarda éste para ejecutar dicha cirugía; si, por el contrario, se trata de un cirujano externo, el funcionario encargado de la programación procederá a designar un valor promedio de tiempo a la cirugía a partir de los tiempos empleados por los especialistas internos de la clínica. La información histórica de los tiempos quirúrgicos ha sido recolectada durante los últimos tres años. Sin embargo, estos datos no han sido debidamente examinados, de manera que es posible analizar la correspondencia entre los valores asignados a estos tiempos quirúrgicos y los tiempos que efectivamente han durado estos procedimientos.

(2) Por otro lado, la reprogramación de cirugías es un fenómeno que debe examinarse detenidamente en este proceso. Reprogramar una cirugía implica cancelar su ejecución que estaba asignada dentro de un bloque, horario y sala, para proceder a reasignarla en otro espacio disponible en el futuro. Estas reprogramaciones pueden ocurrir de acuerdo con dos tipos de factores: aquellos *controlables por la clínica* (reprogramaciones por cambios solicitados por el cirujano o desbordamiento de tiempos de cirugía) y aquellos que resultan *incontrolables* (cambios solicitados o requeridos por el paciente mismo, motivos tales como el padecimiento de una enfermedad en fechas cercanas a su cirugía). El jefe de salas de cirugías y su grupo de programación coinciden y afirman, de manera intuitiva, que se puede aumentar la utilización de salas de cirugías y que los indicadores de cancelación pueden reducirse de un 9,3% a un 5% de cancelaciones semanales, si este aspecto se tiene en cuenta desde el proceso de planeación.

De este modo, se identificó un factor problemático dentro de este proceso de la asignación de salas de cirugías que impiden el aumento del porcentaje de utilización de estas: *la estimación de los tiempos quirúrgicos y su relación con la existencia de reprogramaciones de cirugías*. Una estimación más precisa de estos tiempos permitiría una disminución en la cantidad de cirugías que deben reprogramarse debido a que una cirugía anterior excedió su tiempo quirúrgico definido (*overtime*) que impide que otro procedimiento pueda ser desarrollado en ese mismo bloque temporal. Para la toma de estas decisiones se consideraron factores que restringen el problema, tales como: el tiempo de preparación de una sala para su posterior cirugía, la disponibilidad del conjunto de recursos físicos (camas, salas, instrumentos quirúrgicos, entre otros), la disponibilidad de personal (cirujanos, enfermeras, anestesiólogos), el tiempo máximo que se puede utilizar una sala para una determinada cirugía, entre otros.

2. Antecedentes

Han sido múltiples los enfoques que pueden ser identificables dentro de la literatura con relación a estas temáticas. Ya Liu, Chengbin Chu y Kanliang Wang (2010) plantearon y desarrollaron un modelo matemático de programación dinámica y una heurística de manera que sea posible minimizar los costos totales derivados de la programación de cirugías. Estos autores definieron este problema a partir de la asignación de las cirugías programadas dentro de los intervalos de tiempo considerados como "disponibles" para el desarrollo de estas cirugías (denominados *time slots*). Estos "*time slots*" establecen los intervalos en los cuales cada sala puede ser utilizada para ejecutar cirugías. El modelo base de su planteamiento utiliza como variable de decisión el conjunto en cada intervalo de tiempo que pertenezca al horizonte de programación, de manera que se determine una programación diaria del uso eficiente de estas salas, buscando cumplir esta tarea con el menor costo posible.

Por otro lado, Nadine Meskens, David Duvivier y Arnault Hanset (2012) realizaron un estudio a partir del análisis de los datos de un hospital universitario en Bélgica. Establecieron un modelo de programación multi-objetivo considerando minimizar la duración total de los pacientes en el sistema del centro hospitalario dentro del horizonte de programación, concepto comúnmente conocido como el *makespan*; minimizar el tiempo adicional que sea necesario para la ejecución de cada cirugía (denominado *overtime*) y maximizar las afinidades de los equipos quirúrgicos que sean asignados para cada cirugía. En este orden de ideas, el modelo construido toma en cuenta los siguientes factores para la toma de decisiones: la programación de las intervenciones quirúrgicas por bloques, la programación de las cirugías y salas de operación, y el uso de los recursos materiales, al igual que la composición humana de los equipos quirúrgicos.

Mengyu Guo, Su Wu, Binfeng Li, Jie Song, y Youping Rong (2014) han destacado y analizado el papel que cumplen las enfermeras dentro de la programación quirúrgica. Las enfermeras constituyen un recurso humano muy importante y a la vez limitado, puesto que su trabajo les obliga a estar en constante rotación y movimiento, dependiendo de las condiciones de atención de los hospitales y del panorama en cuanto al caso de las urgencias. Utilizando un modelo de programación lineal y posteriormente un algoritmo genético, el objetivo de este trabajo fue la minimización de la cantidad de salas de cirugías y de enfermeras a utilizar en cada caso.

Por su parte, Wei Xiang, Jiao Yin y Gino Lim (2012) toman en cuenta otro aspecto fundamental: el proceso de postcirugía. Normalmente los autores han dado por hecho que siempre existirá disponibilidad de camas para los pacientes que han sido previamente operados y que deben recibir una atención de recuperación hasta que

sean dados de alta o transferidos a habitaciones privadas, según sea el caso. Estos autores han estructurado una aplicación metaheurística de Colonia de Hormigas (*Ant Colony Optimization*, ACO) para minimizar el *makespan* en un horizonte determinado, a partir de la relación de precedencia entre las etapas de las cirugías, la asignación de los recursos a cada una y la hora de inicio para cada procedimiento quirúrgico.

Vivek Rreddy Gunna, Amin Abedini y Wei Li (2017) plantean una función objetivo completamente diferente a los casos anteriormente descritos, puesto que proponen el concepto del beneficio esperado, que surge de la mejora del flujo de pacientes dentro del sistema de cirugías. Para ello, construyeron un modelo de optimización fundamentado en los tiempos de procesamiento de las operaciones y el tiempo entre llegadas de los usuarios, teniendo en cuenta una programación por bloques a través a la técnica de la selección de portafolio (PS). Ésta consiste en decidir cuales asignaciones representan un mayor nivel de riesgo y/o de beneficio para un hospital.

2.1. Panorama del concepto de reprogramación

Un factor poco estudiado en la literatura es el fenómeno de las reprogramaciones de cirugías de pacientes electivos. Por definición, los casos electivos son aquellos que se programan con anticipación dado que no son de naturaleza urgente o de emergencia, usualmente son planificados con días de anterioridad. Igualmente, una reprogramación ocurre cuando se presenta una alteración al cronograma previamente construido de la asignación de salas cirugías, debido a múltiples factores. En algunos casos, está permitida la inserción de una cirugía en la planificación diaria sin llegar a afectar el tiempo de inicio de las demás operaciones, conocido como programación de casos "*add-on*", donde las cirugías son añadidas dentro de la planificación al inicio del día (Allen, Taafe, & Ritchie, 2014). La cancelación o aplazamiento de cirugías electivas es común cuando el tiempo de una sala se acomoda mejor a cirugías no electivas o casos *add-on* (Dexter & Traub, 2002).

Li, Gupta y Potthoff (2013) muestran que es posible mejorar la programación de salas de cirugía al reprogramar su planificación el mismo día de operaciones para minimizar los costos de personal. Por su parte, Pham y Klinkert (2008) desarrollaron una perspectiva general para el problema de reprogramación al extender el modelo matemático clásico de formulación por una programación *job-shop* de tal forma que minimice el *makespan* de las cirugías. En adición a las propuestas anteriores, Adan, Bekkers, Dellaert, Jeunet y Vissers (2011) desarrollaron un esquema de planificación con un nivel de holgura, en el cual la asignación de las salas de operación tenga en cuenta los casos de emergencia y permita planificar una cirugía de urgencia; las métricas de desempeño en estos casos son desarrolladas teniendo en cuenta el servicio del paciente y eficiencia del hospital.

De la anterior revisión de la literatura es posible identificar una serie de aspectos comunes entre sus contenidos y que pueden tomarse para estructurar el aplicativo que se desea desarrollar en este proyecto. En primer lugar, estos trabajos consideran que la programación de cirugías y salas debe plantearse de una manera cíclica, por lo que es necesario determinar un horizonte de planeación inicial y a través de éste programar las cirugías que deberán ejecutarse dentro del mismo. Segundo, se identifica la importancia de seleccionar el horario disponible diariamente para cirugías y estructurar unos bloques de tiempo determinado para asignar los procedimientos quirúrgicos en dichos espacios, garantizando que se programen solamente aquellas cirugías que puedan cumplirse en su totalidad dentro de cada *time slot*. Tercero, estas propuestas plantean una solución inicial como base para la construcción de un algoritmo, regla de decisión o herramienta que mejore dicha alternativa. Finalmente, es importante considerar en la planificación un nivel de holgura en los tiempos quirúrgicos, de tal modo que se disminuya la probabilidad de existencia de reprogramaciones controlables por la clínica, reduciendo el riesgo de incurrir en costos logísticos, administrativos o desmejorar el nivel de servicio al cliente.

3. Objetivos

El objetivo general de este proyecto es *diseñar un aplicativo que determine la programación operativa de las salas de cirugía de una clínica en Colombia, buscando maximizar su utilización y teniendo en cuenta la reprogramación de las cirugías.*

Objetivos específicos:

- Analizar los factores influyentes en la toma de decisiones del proceso actual de programación de salas de cirugía.
- Realizar un análisis estadístico sobre los datos históricos de tiempos quirúrgicos que posee la clínica.
- Diseñar un aplicativo para la programación de salas de cirugías con base en los factores identificados.
- Desarrollar el aplicativo.
- Validar y comparar los resultados de la solución con base en el proceso actual.

4. Metodología

La metodología se desarrolló mediante cuatros fases que abarcaron los objetivos planteados (ver Ilustración 2). En la primera se realizó la recolección de información con ayuda del personal de la clínica y mediante métodos cualitativos y cuantitativos se determinó el conjunto de factores que componen el aplicativo. En segundo lugar, se analizaron estadísticamente los datos históricos de cirugías ejecutadas y se propuso la estandarización de tiempos quirúrgicos por procedimiento y cirujano. Tercero, se diseñó e implementó el aplicativo, teniendo en cuenta un modelo matemático de programación lineal, una regla de despacho y una metaheurística. Finalmente, se evaluó la programación resultante de la ejecución del aplicativo mediante una simulación que consideró los diferentes escenarios planteados en el protocolo de validación.

Determinación de factores	Análisis estadístico	Diseño e implementación del aplicativo	Evaluación del aplicativo
<ul style="list-style-type: none"> • Recolección de información • Análisis del proceso actual de asignación de cirugías • Método de ponderación de factores 	<ul style="list-style-type: none"> • Depuración y categorización de datos • Análisis de correlación • Estandarización de tiempos quirúrgicos bajo criterios 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo Programación Lineal • Regla de despacho: Earliest Due Date (Fecha de entrega más temprana) • Metaheurística: Algoritmo Genético 	<ul style="list-style-type: none"> • Protocolo de validación • Simulación • Análisis de resultados

Ilustración 2. Fases del proyecto

4.1. Determinación de factores

Se recolectó información del proceso de asignación y programación de cirugías a través de reuniones con el jefe de salas de cirugía y el personal encargado de este proceso, con el fin de establecer la lista de posibles factores a considerar para el desarrollo posterior del modelo. Se identificaron 34 factores.

Con el objetivo de definir los parámetros y restricciones que son claves a la hora de tomar decisiones en la programación de cirugías, se empleó el método de ponderación de factores, usado por los autores Paz, R. C., y Gómez (2012) para la selección de estos componentes. Este método consiste en definir los criterios determinantes del proyecto, asignándoles valores ponderados de peso relativo, de tal forma que la suma de estos sea igual a 1. En la Tabla 1 se pueden observar los criterios seleccionados.

<i>Criterio</i>	<i>Descripción</i>	<i>Peso ponderado</i>
<i>Proceso actual o innovación</i>	Es definitivo en el proceso actual o aporta un valor agregado	34%
<i>Viabilidad</i>	Es medible, controlable (no estocástico) y puede ser aplicado en el horizonte de planeación del proyecto.	33%
<i>Necesidad</i>	Los directivos de la clínica concuerdan que es un factor necesario para la programación de cirugías.	33%

Tabla 1. Peso ponderado de criterios

Se calificó cada factor de acuerdo con los criterios mencionados asignándoles un valor numérico de 1 a 5, siendo 5 la calificación más alta, implicando que el factor cumple con el criterio, y 1 la más baja. En la Tabla 2 se describen las valoraciones y decisiones para cada uno de los factores.

<i>Calificación</i>	<i>Decisión</i>
<i>Mayor o igual a 4 puntos</i>	Determinante en la toma de decisiones del proceso y fue parte del aplicativo
<i>Entre 3 y 4 puntos</i>	Tiene posibilidad de ser componente del aplicativo
<i>Menos de 3 puntos</i>	No fue tomado en cuenta en el aplicativo

Tabla 2. Calificación de factores

Una vez seleccionados los factores, se tuvo un punto de partida para la investigación, análisis, diseño y desarrollo de la metodología descrita a continuación.

4.2. Análisis estadístico

Uno de los objetivos clave de este proyecto es el cálculo de tiempos estándar para cada tipo de procedimiento y para cada cirujano. De esta manera, se busca ofrecer una herramienta cuantitativa que permita a los funcionarios de la clínica asignar tiempos quirúrgicos estándar que se tendrán en cuenta en el proceso de programación de salas, utilizando un nivel de criterio mayor a la experiencia del cirujano o del programador. Dentro de la literatura se han encontrado diferentes estrategias para estimar estos tiempos. Los autores Hadhemi Saadouli, Badreddine Jerbi, Abdelaziz Dammak, Lotfi Masmoudi y Abir Bouaziz (2014) determinaron que todo procedimiento debía tener como tiempo estándar el valor equivalente a su percentil 85, buscando tomar la mayor cantidad de las observaciones históricas de cada tipo de cirugía. Por su parte William Spangler, David Strum, Luis Vargas y Jerrold May (2004) plantearon un enfoque matemático y determinaron un estimador para calcular cada tiempo estándar de cada procedimiento partiendo del supuesto de que éstas tenían una distribución log-normal.

Tomando estos y otros enfoques, se decidió desarrollar una metodología para el cálculo de estos tiempos partiendo de los datos históricos de cada procedimiento efectuado (fecha, duración, hora de inicio, entre otros) que la clínica ha consolidado y reunido desde el año 2015. De esta manera se ha tomado una base de datos histórica de aproximadamente 30.000 cirugías. Previo a realizar el análisis, se depuraron minuciosamente datos atípicos, información sensible o que no se almacenó correctamente debido a errores de digitación. Adicional a esto se categorizaron procedimientos, cirujanos y especialidades con el fin de simplificar y estructurar el análisis. En primer lugar, se ejecutó una prueba de Kolmogorov-Smirnov para determinar si el total de cirugías tenían una distribución normal con respecto a sus tiempos quirúrgicos. Debido a que esta prueba demostró que no era el caso, fue necesario plantear un análisis no paramétrico para la determinación de los tiempos estándar.

4.2.1. Tiempos estándar por procedimiento

Se buscó obtener la distribución de probabilidad más ajustada para cada procedimiento mediante la funcionalidad de Experfit del software FlexSim. Cabe aclarar que Experfit solo considera aquellas muestras que tengan 30 o más observaciones, por este motivo los procedimientos con observaciones menores a esta cantidad no son estadísticamente representativos y se les asignó el valor de la media muestral como su tiempo estándar. Para los procedimientos estadísticamente significativos, se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- Coeficiente de asimetría: determina si la distribución está centrada alrededor de su media, o si por el contrario tiene mayor concentración de datos hacia alguno de sus extremos.
- Ubicación de la media aritmética dentro de los percentiles de la muestra: define el intervalo dentro del cual se encuentra la media y qué porcentaje de los datos abarca por cada procedimiento.
- Existencia de datos atípicos en la izquierda o derecha a través del cálculo del rango intercuartílico.
- Curtosis: permite decidir el tipo de curva que tiene cada procedimiento.

Los tiempos estándar por procedimiento fueron asignados con estos criterios de la siguiente manera (ver Tabla 3).

Tiempo Estándar Escogido	Casos en los que aplica
Mediana	Aquellos procedimientos cuya duración promedio incluye menos del 50% de sus cirugías, independientemente de su asimetría, curtosis o presencia de datos atípicos.
	Aquellos procedimientos cuya duración promedio se ubica entre los percentiles 50 y 60, y que cuenta con puntos atípicos en el extremo derecho que buscan neutralizarse asignando el tiempo estándar en el 50%.
Media	Aquellos procedimientos con menos de 30 observaciones dentro de la base histórica trabajada en el proyecto.
	Aquellos procedimientos cuya duración promedio se ubica entre los percentiles 50 y 60, y tienen datos atípicos ambos extremos de su distribución.
	Aquellos procedimientos cuya duración promedio es mayor que por lo menos el 50% de sus cirugías, y que tienen una asimetría menor a 1 y cercana a 0, por lo que puede afirmarse que está centrada sobre la media.
Percentil 60	Aquellos procedimientos cuya duración promedio se ubica entre los percentiles 50 y 60, y que tienen una asimetría mayor a 1, por lo que puede afirmarse que está no centrada sobre la media y por eso se busca aproximar el tiempo estándar el percentil indicado
	Aquellos procedimientos cuya duración promedio es mayor que por lo menos el 60% de sus cirugías, y que tienen una asimetría menor a 1 y cercana a 0, por lo que puede afirmarse que está centrada sobre la media.
Percentil 70	Aquellos procedimientos cuya duración promedio se ubica entre los percentiles 60 y 70, y que tienen una asimetría mayor a 1, por lo que puede afirmarse que está no centrada sobre la media y por eso se busca aproximar el tiempo estándar el percentil indicado
	Aquellos procedimientos cuya duración promedio es mayor que por lo menos el 70% de sus cirugías, y que tienen presencia de datos atípicos en su extremo derecho que buscan ser neutralizados asignando el tiempo estándar en este estimador.

Tabla 3. Selección de tiempo estándar por procedimiento

4.2.2. Tiempos estándar por cirujano y procedimiento

Posteriormente, se analizó si el cirujano podía considerarse como un factor significativo para el cálculo del tiempo estándar de cada procedimiento. Para ello se desarrolló un análisis de varianza (ANOVA) de un factor para cada par de cirujano-procedimiento. En los casos en los cuales el *p*-value del ANOVA resultaran mayores a 0.05, se concluyó que el cirujano no influía estadísticamente en el tiempo del procedimiento, razón por la cual para cada par que cumpliera con esta condición se limitó el cálculo de su tiempo estándar únicamente a aquel calculado para el procedimiento.

Por el contrario, si el *p*-value resultaba menor a 0.05, se concluyó que el cirujano si influía estadísticamente en la duración del procedimiento; para estos casos se ejecutó una verificación adicional: si el cirujano había realizado el procedimiento en una cantidad mayor al promedio calculado de cantidad de veces que un mismo cirujano realizaban un mismo procedimiento (cantidad equivalente a ocho cirugías), se asignó como tiempo estándar el tiempo promedio del cirujano para el procedimiento. En caso de que no se cumpla con esta condición este cálculo se limita también al tiempo estándar asignado para el procedimiento.

4.3. Diseño y desarrollo del aplicativo

En esta sección se estipulan los diferentes diseños y metodologías implementadas para modelar el problema y desarrollar el aplicativo.

4.3.1. Modelo Programación Lineal (MPL)

Como primera metodología de solución de este problema se planteó un modelo de programación lineal entero mixto a partir de los factores claves para la programación de salas de cirugía. La función objetivo consiste en minimizar la tardanza total de las cirugías programadas y de aquellas que quedan en cola. La tardanza es la diferencia en días de la fecha de programación y la fecha deseada. Si una cirugía se ejecuta antes o en el mismo día de su plazo máximo, no hay tardanza.

La notación de los conjuntos, parámetros y variables de decisión se presentan en las Tablas 4, 5 y 6, respectivamente.

Notación Matemática	Conjunto
$S = \{1, \dots, 7\}$	Salas de Cirugía
$A = \{a, b, c\}$	Prioridad de cada cirugía electiva
$T = \{1, \dots, 48\}$	Periodos - Intervalos de tiempo de 15 minutos.
$D = \{1, \dots, 7\}$	Días - Horizonte de programación de una semana.
$I = \{1 \dots Cola\ de\ cirugías\}$	ID Cirugía (Identificador)
$C = \{1 \dots 210\}$	Cirujanos
$E = \{1, \dots, Equipos\ especiales\}$	Equipos especiales
$P = \{1, \dots, 35\}$	Especialidad – Tipo de procedimiento

Tabla 4. Conjuntos

Notación Matemática	Parámetros
$CIRESP_{ip}$	Binario, 1 si la cirugía i pertenece a la especialidad p , 0 de lo contrario.
$CIRCIRUJANO_{ic}$	Binario, 1 si la cirugía i es operada por el cirujano c , 0 en caso contrario.
$MAXOCUP$	Porcentaje máximo de ocupación de cada sala
$SALAESP_{spt}$	Binario, 1 si en la sala s se operan cirugías de especialidad p , en el periodo t del día d .
$HORARIOCIRUJANO_{cdt}$	Binario, 1 si cirujano c puede operar en el periodo t en el día d .
$CIRUJANOSALA_{csd}$	Binario, 1 si el cirujano c puede operar en la sala s en el día d .
$DUREST_i$	Duración estimada del procedimiento identificado con la cirugía i .
$ALISTA_p$	Tiempo de alistamiento para una cirugía asociada con la especialidad p .
$DURTOTAL_i$	Duración total del procedimiento identificado con la cirugía i , teniendo en cuenta su alistamiento.
$FECHARAD_i$	Fecha de radicación (en número de días) de la cirugía i .
$MAXPROG_a$	Plazo máximo de programación (en número de días) de una cirugía de categoría de prioridad a .
$CIRCAT_{ia}$	Binario, 1 si la cirugía i tiene asignada la categoría de prioridad a , 0 de lo contrario.
$BINARIODESAROLLO_{itl}$	Binario, 1 si la cirugía i puede ejecutarse durante el periodo t , dado que fue empezada en el periodo l .
$BINARIOINICIO_{it}$	Binario, 1 si la cirugía i puede comenzar en el periodo t , de tal manera que pueda completarse el total de su duración calculada; 0 de lo contrario.
$FECHADESEO_i$	Fecha máxima teórica en la cual un paciente debe ser operado.
$CANTEQUIP_e$	Cantidad de equipos de tipo e disponibles en la clínica.
$CIREQUIP_{ie}$	Binario, 1 si la cirugía i requiere una unidad de equipo tipo e , 0 de lo contrario.

Tabla 5. Parámetros

Notación Matemática	Variable de Decisión
INI_{idst}	Binaria, 1 si se asigna la cirugía i a la sala s , el día d , iniciando a partir del periodo t , 0 de lo contrario.
$EJECUCION_{idst}$	Binaria, 1 si la cirugía i es ejecutada en el periodo t dentro de la sala s durante el día d , 0 de lo contrario.
FIN_{idst}	Binaria, 1 si se asigna la cirugía i a la sala s , el día d , terminando luego del periodo t , 0 de lo contrario
$FECHAOPERADO_i$	Determina la fecha en la que la cirugía i tiene lugar, de ser asignada.
$TARDANZA_i$	Determina la tardanza de la cirugía tipo i
$UTILIZACION_{ds}$	Porcentaje de utilización de la sala s durante el día d .
$NOPROG_i$	Binaria, 1 si la cirugía i no es programada durante el horizonte de programación; 0 en caso contrario

Tabla 6. Variables de decisión

La formulación de la función objetivo busca minimizar la suma de la tardanza de las cirugías programadas y aquellas no programadas (para las segundas se asignará una fecha ficticia de programación equivalente al día inmediatamente posterior al final del horizonte de programación ($|D|+1$))

(1)

$$MIN Z = \sum_{\forall i \in I} \sum_{\forall a \in A} TARDANZA_i * CIRCATA_{ia}$$

A continuación, se expondrán las principales restricciones planteadas en este modelo.

La primera restricción indica la fecha de operación de una cirugía, la cual consiste en el día del horizonte de programación en el cual se inicia y ejecuta.

(2)

$$FECHAOPERADO_i \geq \sum_{\forall s \in S} \sum_{\forall t \in T} \sum_{\forall d \in D} d * INI_{idst} \quad ; \forall i \in I$$

La siguiente restricción realiza el cálculo de tardanza de una cirugía, la cual equivale a la diferencia entre la fecha de operación respecto de la fecha máxima teórica permitida de acuerdo con su tipo de prioridad.

(3)

$$TARDANZA_i \geq (FECHAOPERADO_i - FECHADESEO_i); \forall i \in I$$

La ecuación 4 delimita cuándo una cirugía se da por finalizada si es iniciada, y se asigna dicho fin, se hace de acuerdo con el periodo de inicio más los periodos de su duración.

(4)

$$INI_{idst} \geq FIN_{idst} + DURTOTAL_i \quad ; \forall i \in I, d \in D, s \in S, t \in T$$

El modelo tiene en cuenta que las salas tienen especialidades y cirujanos asignados en cada periodo de tiempo. De este modo, las siguientes restricciones indican que una cirugía tiene asignada una especialidad y no todas las salas permiten operar todas las especialidades. Además, no todos los cirujanos pueden operar todas las cirugías, y su ejecución está condicionada a la disponibilidad de horario del especialista.

(5)

$$EJECUCION_{idst} * CIRESP_{ip} \leq SALAESP_{sptd} \quad ; \forall i \in I, d \in D, s \in S, t \in T, p \in P$$

(6)

$$EJECUCION_{idst} * CIRCIRUJANO_{ic} \leq CIRUJANOSALA_{csd} \quad ; \forall i \in I, d \in D, s \in S, t \in T, c \in C$$

La siguiente ecuación determina el porcentaje de utilización de una sala, la cual se calcula como la proporción de periodos en los que una sala está ocupada diariamente y la cantidad total de periodos disponibles para asignar.

(7)

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \frac{EJECUCION_{idst}}{|T|} \leq UTILIZACION_{ds} \quad ; \forall d \in D, s \in S$$

Finalmente, si una cirugía no está programada se le asignará una fecha posterior programación al horizonte temporal definido para el *scheduling*.

(8)

$$FECHAOPERADO_i \geq (|D| + 1) - ((1 - NOPROG_i) * M); \quad \forall i \in I$$

Para ver la versión completa del modelo de programación lineal, dirigirse al Anexo 4.

4.3.2. Regla de despacho

Actualmente la programación de cirugías electivas se efectúa categorizando la prioridad de cada caso, asignando una fecha máxima de servicio a cada cirugía. De acuerdo con la valoración médica, estos plazos pueden ser de 15, 30 o 60 días contados a partir de la fecha de radicación del procedimiento. Primero, se organiza la lista de cirugías pendientes de acuerdo con su fecha máxima de servicio en orden ascendente. Teniendo en cuenta lo anterior, se decidió implementar en el aplicativo una regla de despacho *Earliest Due Date* (EDD), donde se usa el mismo concepto de ordenamiento por plazo de entrega, la asignación se efectúa teniendo en cuenta restricciones como:

- Horario de los cirujanos: cada cirujano está habilitado para operar en determinadas franjas horarias, esta restricción es actualizada mensualmente por los directivos y jefes de salas de cirugía.
- Asignación de los cirujanos a las salas de cirugía: cada cirujano está autorizado a operar en una sala establecida.
- Equipos especiales: las cirugías que requieren de un equipo especial están sujetas a la cantidad disponible de dicho recurso.
- Porcentaje máximo de ocupación: cada sala puede ser ocupada por cirugías programadas hasta un 85%. Este límite de utilización es un valor empírico que la clínica ha definido para tener un tiempo de holgura, disminuyendo el riesgo de reprogramaciones a causa de *overtime* y disponer de espacio para la programación de cirugías de tipo prioritario.

La regla de despacho EDD fue escogida debido a que se asemeja a la actual asignación manual de cirugías que se lleva a cabo en la clínica, que busca minimizar la tardanza y mejorar indicadores de servicio. La función objetivo del modelo propuesto es la minimización de la tardanza de ejecución de las cirugías.

4.3.3. Algoritmo genético (AG)

Según los autores Abdeljaouad, Saadani y Bahroun (2014) y de acuerdo con los resultados obtenidos en el modelo de programación lineal, este problema se clasifica como uno de tipo NP-difícil (*NP-hard*), y por tal motivo es aconsejable abordarlo aplicando metaheurísticas. Las metaheurísticas buscan mejorar una solución inicial a partir de una búsqueda iterativa de posibles soluciones. En este caso se ha escogido aplicar un algoritmo genético que tenga la misma función objetivo del EDD. Los autores estudiados plantean diferentes estrategias para la ejecución del algoritmo. Según Inês Marques, Maria Eugenia Captivo y Margarida Vaz (2013), el aspecto clave de la aplicación de este tipo de solución es escoger y diseñar la metodología que se pueda ajustar a las necesidades del problema y a los objetivos que se planteen en el *scheduling*.

Dentro del paradigma del AG se tienen dos componentes fundamentales: la representación de la solución, denominada cromosoma, y los cruces que se realizan para generar una nueva descendencia. De acuerdo con la complejidad y las restricciones del problema de programación de cirugías se utilizó una codificación entera vectorial de una sola dimensión, en la cual cada gen del cromosoma contiene el identificador de una cirugía. Esta representación se seleccionó puesto que permite modelar una solución de manera sencilla, simplificando el problema y disminuyendo la complejidad y tiempo de procesamiento. Además, se asegura que el conjunto de posibles soluciones sea siempre factible. El orden de los genes de cada cromosoma es importante debido a que estos ingresan a la heurística de asignación y planificación siguiendo esta secuencia. Por ende, se asignan primero las cirugías de las posiciones iniciales del vector. Un ejemplo de cromosoma es un vector con los identificadores de las cirugías organizadas por fecha de radicación.

En este caso se implementó un algoritmo genético híbrido, porque se combinan los principios del AG con la heurística anteriormente descrita para programar una cirugía, calcular su función objetivo, generar y seleccionar las mejores soluciones. Los parámetros de entrada se mantienen iguales a los de la regla de la regla de despacho. La población inicial se generó aleatoriamente a partir de cruces entre dos vectores que tienen en cuenta reglas de prioridad. El primero contiene cirugías organizadas de acuerdo con su tardanza (*Earliest Due Date EDD*) y el segundo está ordenado ascendentemente de acuerdo con el tiempo quirúrgico promedio de cada cirugía (*Shortest Processing Time SPT*). El tamaño de la población se estableció en 8 individuos.

Una vez definida la población inicial, se calculó la función de fitness de cada individuo, que equivale al inverso de la función objetivo, porque en el algoritmo genético se maximiza el beneficio que genera la población. De acuerdo con su función de adaptabilidad se le asigna una probabilidad de ser padre a cada cromosoma. Después mediante un proceso de selección aleatoria, denominado selección por ruleta, se escogen parejas de padres que generarán una nueva generación. Cada pareja de padres tiene una probabilidad de generar descendencia. Cuando son seleccionados para generar la descendencia se realiza el proceso de cruce. El cruce o *crossover* se realiza mediante una máscara binaria, que aleatoriamente asigna 1 o 0 en cada posición de un vector. Se valida cada casilla del vector binario, si es 1 el hijo 1 obtendrá el gen del padre uno en esa casilla y el hijo 2 obtendrá el gen del padre 2; en el caso contrario, cuando es 0, el hijo 1 recibe el gen del padre 2 y el hijo 2 del padre 1. En cada asignación se valida que el gen asignado a cada hijo no haya sido previamente recibido, en ese caso, se deja la casilla vacía para luego completar de acuerdo con otro proceso aleatorio. En la Ilustración 3 se puede observar un ejemplo de este cruce.

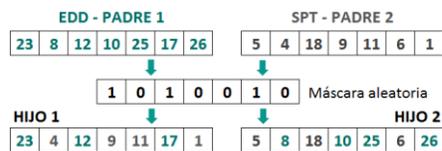


Ilustración 3. Cruce de cromosomas

Para completar la información faltante de cada hijo se recorre su vector solución hasta encontrar una casilla faltante; en ese momento, aleatoriamente se selecciona el padre y la dirección en la que se buscará la información faltante de esa casilla. Por ejemplo, en la primera casilla del hijo 1 se selecciona el padre 2 y se revisa el identificador de la cirugía que hace falta en el hijo 1 recorriendo el padre 2 desde su última casilla hasta el inicio de su vector en búsqueda del primer identificador faltante para asignarlo a la casilla faltante del hijo 1. Este cruce con máscara y asignación aleatoria permite que exista mayor diferenciación entre los padres e hijos generados, adicionalmente las cirugías que están ubicadas en las últimas posiciones de los padres tienen la posibilidad de ser asignadas en las primeras posiciones de los hijos, permitiendo explorar un mayor espacio de posibles soluciones factibles, que no converja prontamente hacia una única solución, sino que se diversifique la búsqueda en otras zonas.

Después del cruce, se evalúa aleatoriamente si cada hijo tendrá o no mutación en sus genes, comportamiento que tiene una probabilidad del 5%. La mutación consiste en realizar intercambios aleatorios entre pares de cirugías dentro del cromosoma del individuo. La cantidad de intercambios está definida en 50 ocurrencias.

Posteriormente se calcula la función fitness de hijo y la nueva población se organiza de mayor a menor de acuerdo con su función de adaptabilidad. Para seleccionar la población que avanza a la siguiente generación se incluyen el 60% (porcentaje con base en la población inicial) de los individuos con mejores soluciones y se selecciona aleatoriamente 40% de los individuos no seleccionados. Al finalizar este proceso de selección se eliminan aquellos individuos no seleccionados y la población cuenta de nuevo con ocho individuos. Luego continúa el proceso de selección de padres, generación de nuevos individuos y selección de la nueva generación se realiza tantas veces como se especifique en el parámetro de entrada correspondiente al número máximo de iteraciones. El criterio de finalización del algoritmo es completar la cantidad de iteraciones o generaciones especificadas. Al finalizar, se selecciona el individuo con mejor función fitness (cromosoma ganador), y se realiza su asignación.

Teniendo en cuenta lo anterior, se decidió diseñar un aplicativo desarrollado en la herramienta de Microsoft Excel, Visual Basic for Applications, en la cual los funcionarios de la clínica pueden hacer uso de éste dentro del proceso de programación de cirugías.

4.4. Evaluación del aplicativo

Como se explicó anteriormente, el aplicativo usa dos metodologías diferentes para realizar la programación de cirugías. La primera es una regla de despacho EDD y la segunda es un algoritmo genético. Debido a esto, se evidenció de establecer un método para evaluar estas soluciones de acuerdo con las restricciones tenidas en cuenta y poder identificar las condiciones en las cuáles se logran los mejores indicadores de desempeño. Para ello, se redactó un protocolo de validación (ver Anexo 7) donde se plantearon 10 casos diferentes en los cuales se combinan los siguientes modelos de programación, restricciones y escenarios:

- **Escenario 1:** Se tienen siete (7) salas disponibles para la programación de cirugías con una utilización máxima del 85% por cada sala. Esta es la forma en la que actualmente los funcionarios de la clínica programan las cirugías.
- **Escenario 2:** Se tienen seis (6) salas disponibles para programar cirugías utilizando el 100% de la capacidad de cada sala; la séptima sala estará disponible para aquellas cirugías que deben ser reprogramadas dentro del proceso de ejecución (simulación). Este es un planteamiento de programación hipotético, resultante de una propuesta para mejorar los indicadores de reprogramación del escenario de referencia.

En la *√ el caso sí tiene en cuenta la restricción - × el caso no tiene en cuenta la restricción

Tabla 7 se resumen los casos a ser evaluados junto con las restricciones, tipo de asignación y escenario de programación que cada uno contempla.

Caso	Asignación	Escenario	Restricciones	
			Horario de cirujanos*	Salas de cirujanos*
EDD C1	Earliest Due Date	1	√	√
EDD C2	Earliest Due Date	2	√	√
EDD C3	Earliest Due Date	1	√	×
EDD C4	Earliest Due Date	2	√	×
EDD C5	Earliest Due Date	1	×	×
AG C1	Algoritmo genético	1	√	√
AG C2	Algoritmo genético	2	√	√
AG C3	Algoritmo genético	1	√	×
AG C4	Algoritmo genético	2	√	×
AG C5	Algoritmo genético	1	×	×

*√ el caso sí tiene en cuenta la restricción - × el caso no tiene en cuenta la restricción

Tabla 7. Casos y sus respectivas restricciones

4.4.1. Herramienta de simulación

Posteriormente, se efectuó el diseño y desarrollo de una herramienta de simulación que permite analizar el comportamiento en la ejecución de las programaciones de cirugías obtenidas en cada escenario. Esta simulación consiste en tomar la programación final y ejecutar cada cirugía con una duración que es seleccionada al azar respecto de los tiempos históricos que se tienen registrados de cada procedimiento. Esta técnica de elección aleatoria de tiempos asegura mantener la distribución de probabilidad identificada para cada procedimiento quirúrgico dentro del análisis estadístico, teniendo en cuenta el nivel de variabilidad en la duración de la ejecución de cada cirugía programada inicialmente.

Las cirugías programadas son ejecutadas en cada sala periodo por periodo. La simulación se desarrolla bajo el supuesto de que la cirugía que no es ejecutada dentro del horizonte temporal se considerará reprogramada y será incluida de nuevo en la lista de cirugías pendientes para el siguiente horizonte de programación. Los indicadores resultantes de la programación de cada escenario son el valor de la función objetivo, la cantidad de cirugía programadas, la cantidad de cirugías programadas con y sin tardanza, y el porcentaje promedio de utilización de las salas.

5. Componente de diseño en ingeniería

Este capítulo describe los módulos de diseño en ingeniería que se tuvieron en cuenta para este proyecto.

5.1. Declaración de diseño

Este proyecto desarrolló una estrategia de resolución y un posterior aplicativo que determine y calcule los diferentes horarios y asignaciones de las cirugías electivas, y sus respectivas salas, que se realizan diariamente en una clínica de cuarto nivel de Colombia. Para ello se desarrolló un algoritmo propio y una metaheurística existente en la literatura, dentro de los cuales se escogió aquel que permite la mejor asignación y el mejor resultado de la función objetivo, a partir de las restricciones y necesidades identificadas.

En primera instancia se analizaron los datos históricos proporcionados por la clínica, datos de pacientes operados y procedimientos quirúrgicos realizados en las salas de cirugía, con el fin de definir tiempos quirúrgicos estándar por procedimiento para cada cirujano. Posteriormente, tomando estos tiempos como datos de entrada, se construyó un aplicativo que asigna procedimientos quirúrgicos a las salas disponibles para pacientes electivos en un horizonte temporal de siete días. Éste también fue el punto de partida para el cálculo de indicadores en cuanto al nivel de cumplimiento, tardanzas en cirugías, entre otros, que permitieron identificar oportunidades de mejora y puntos de comparación con el proceso actual. Además, el aplicativo permite simular la programación generada y analizar el comportamiento de los tiempos y salas si se llegaran a ejecutar en estas condiciones.

5.2. Proceso de diseño

En primer lugar, el aplicativo parte de una serie de datos de entrada, que corresponde al conjunto de cirugías que están pendientes por programar y que deben asignarse a una sala, día y periodos de acuerdo con sus tiempos estándar. Para esto se ha creado la cola de cirugías (ver Ilustración 4) donde se hace la lectura de cada procedimiento, su especialidad, su cirujano, la fecha de radicación y la prioridad. El aplicativo contará con una hoja exclusiva para especificar las cirugías por programar.

Cola de Cirugías						
Id Registro	Num Especialidad	Nombre Especialidad	ID procedimiento	Procedimiento	Duración Estandariz	Num Cirujano
1	15	GINECOLOGIA ONCOLOGICA	105	HISTEROSCOPIA	5	20
2	35	UROLOGIA	147	PROSTATECTOMIA	12	35
3	14	GINECOLOGIA	86	RACCION CUERPO EXTRA	5	105
4	14	GINECOLOGIA	105	HISTEROSCOPIA	5	105
5	7	CIRUGIA GENERAL	96	HEMICOLECTOMIA	18	180
6	25	ORTOPEDIA Y TRAUMATOLOGIA-HOMBRO	137	OSTEOSINTESIS	12	198
7	8	CIRUGIA MAXILOFACIAL	138	OSTEOTOMIA	20	127
8	19	NEUROCIRUGIA	79	ESCISION LUMBAR	13	76
9	2	CIRUGIA CARDIOVASCULAR	185	ASCULARIZACION MIOCAR	24	98
10	14	GINECOLOGIA	26	CESAREA	6	145
11	7	CIRUGIA GENERAL	179	RESECCION DE TUMOR	12	96
12	35	UROLOGIA	147	PROSTATECTOMIA	12	143
13	23	ORTOPEDIA Y TRAUMATOLOGIA	158	REEMPLAZO DE RODILLA	12	153
14	14	GINECOLOGIA	49	COLPORRAFIA	7	165
15	7	CIRUGIA GENERAL	96	HEMICOLECTOMIA	18	180
16	14	GINECOLOGIA	104	HISTERECTOMIA	10	188
17	7	CIRUGIA GENERAL	41	COLECISTECTOMIA	9	180
18	35	UROLOGIA	132	NEFRECTOMIA	17	158

Ilustración 4. Cola de cirugías

En segundo lugar, el aplicativo tiene en cuenta un conjunto de parámetros que limitan la cantidad de cirugías que se tomarán de la cola, el horizonte de programación, la cantidad de periodos entre los cuales se va a dividir

cada día a programar y la cantidad de días que tiene como máximo por prioridad para programar una cirugía. La Ilustración 5 muestra la entrada de parámetros del aplicativo.

Parámetros de entrada			
Número de Cirugías	1826	Tiempo de espera deseado z	
Número de salas	7	4A	15
Fecha Inicio Prog	22-01-18	4B	30
Fecha Fin Prog	28-01-18	4C	60
Núm periodos por día	48		
Penalización no programar	30		
% Máximo de Utilización por sala	85%		
Semana programación	1		

Ilustración 5. Parámetros de entrada programación

Tercero, como se ha explicado anteriormente, la solución toma en cuenta las restricciones de asignación de salas por identificador de cirujanos (ver Ilustración 6) de acuerdo con los bloques de 6 horas para cada día. Esta restricción varía dependiendo de cada semana del mes.

		Domingo				Lunes				Martes			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
CUC1	AM	164	136	164	136	20	20	20	20	216	216	216	216
	PM	164	136	164	136	165	180	165	208	216	216	216	216
CUC2	AM	225	225	225	225	169	169	169	169	21	21	21	21
	PM	225	225	225	225	0	0	0	0	65	65	65	65
CUC3	AM	226	6	227	220	158	158	158	158	178	175	193	175
	PM	226	6	227	220	59	59	59	59	178	165	193	165
CUC4	AM	0	0	0	0	96	85	96	178	219	219	219	219
	PM	0	0	0	0	96	193	96	178	219	219	219	219
CUC5	AM	0	0	0	0	218	218	218	218	218	218	218	218
	PM	0	0	0	0	218	218	218	218	218	218	218	218
CUC6	AM	0	0	0	0	80	80	80	80	218	218	218	218
	PM	0	0	0	0	80	80	80	80	218	218	218	218
CUC7	AM	0	0	0	0	40	148	40	148	219	219	219	219
	PM	0	0	0	0	148	148	148	148	219	219	219	219

Ilustración 6. Horarios de cirujanos por sala

Para proceder con la programación, el usuario deberá oprimir uno de los siguientes botones, como se muestra en la Ilustración 7. Uno para la ejecución de la regla de despacho EDD, otro para generar la solución del algoritmo genético, ya sea con el primer o segundo escenario de validación. De igual manera se podrá verificar la factibilidad de la solución o borrar la solución que se encuentre en pantalla.

EDD - 7 salas

AG - 7 salas

EDD - 6 salas

AG - 6 salas

Factibilidad

Borrar

Restricciones

Horario Cirujano Utilizacion Sala
 Cirujano-Sala Equipos especiales
 Simulación

Ilustración 7. Cuadro de mando aplicativo

Una vez ejecutado el algoritmo del aplicativo, ya sea con el EDD o incluyendo el algoritmo genético, se imprimirá la solución (ver Ilustración 8) de la programación de cada una de las salas para cada uno de los días del horizonte de programación. La solución muestra el identificador de cada cirugía por cada uno de los periodos que tenga de duración. Por su parte el tiempo de alistamiento aparece en la pantalla con valores iguales a -1.

DIA 22 January, 2018							
Promedio Tiempo Pr	12						
Tiempos Preparaci	11						
Salas							
Hora	1	2	3	4	5	6	7
7:00	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
7:15	946	1609	561	567	-1	-1	1265
7:30	946	1609	561	567	1328	1010	1265
7:45	946	1609	561	567	1328	1010	1265
8:00	946	1609	561	567	1328	1010	1265
8:15	946	1609	561	567	1328	1010	1265
8:30	946	1609	561	567	1328	1010	1265
8:45	946	1609	561	567	1328	1010	340
9:00	946	1609	561	567	1328	1010	340
9:15	946	1609	561	567	1328	1010	340
9:30	946	1609	561	567	1328	1010	340
9:45	946	1609	561	567	1328	1010	340
10:00	946	1609	561	348	1328	1010	340
10:15	946	1609	561	348	1328	1010	340
10:30	502	124	44	348	1328	1010	340
10:45	502	124	44	348	1328	1010	340
11:00	502	124	44	348	1328	1010	340
11:15	502	124	44	348	1328	1010	340
11:30	502	1120	44	348	1328	1473	738

Ilustración 8. Solución de la programación sugerida

Si la opción de Simulación está activada, el aplicativo genera la programación y posteriormente procederá a efectuar la simulación de la ejecución de las cirugías. La simulación es replicada 500 veces, avisando su comienzo y finalización de operación. El aplicativo desplegará las notificaciones de inicio y fin del proceso de simulación, ver Ilustración 9.

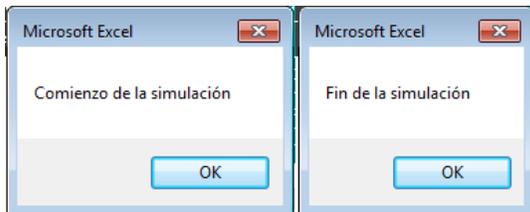


Ilustración 9. Cuadros de diálogo de la simulación

Finalmente, el aplicativo imprime los resultados de los indicadores (ver Ilustración 10) de programación y de ejecución que se han explicado en el protocolo de validación (ver Anexo 7). Estos indicadores se presentan a nivel global para el horizonte de programación y también el promedio diario para el caso de los indicadores de la simulación, como se muestra en la Ilustración 11 y en la Ilustración 12.

Resultados programación		
INDICADORES	Cantidad	Porcentaje
Cirugías Programadas	146	8%
Cirg. Prog. SIN Tardanza	105	72%
Cirg. Prog. Con Tardanza	41	28%
Cirugías NO prog.	1680	92%
Total Cir con Tardanza	1721	94%
% Prom. Utilización Salas	-	64%
Función O.	786	

Ilustración 10. Resultados indicadores programación

Resultados simulación		
Indicadores	Cantidad	Porcentaje
Cirugías Programadas	146	100%
Cirugías Ejecutadas	144	99%
Cirugías reprogramadas	2	1%
Prom. Periodos vacíos	1041	44%
% Prom. Utilización Salas	-	56%

Indicador (prom. diario)	Cantidad	Porcentaje
Cirugías Programadas	21	100%
Cirugías Ejecutadas	21	99%
Cirugías reprogramadas	0	1%
Periodos vacíos (por día)	149	44%
% Prom. Utilización Salas	-	56%

Ilustración 11. Resultados indicadores de simulación

	Días							Total
	1	2	3	4	5	6	7	
Cirugías Programadas	26	22	20	19	24	25	10	30
Cirugías Ejecutadas	25	22	20	19	24	25	10	29
Cir reprog. siguiente Ciclo	0	0	0	0	0	0	0	0
Cir reprog. siguiente día	0	0	0	0	0	0	0	0
Periodos vacíos (por día)	109	110	166	157	140	114	246	66
% Prom. Utilización Salas	68%	67%	51%	53%	58%	66%	27%	97%
Tiempo promedio de reprog.	0	0	0	0	0	0	0	2

Ilustración 12. Resultados indicadores diarios de la simulación

En la

por los directivos y jefes de salas de cirugía.

Utilización sala: cada sala puede ser ocupada por cirugías programadas

Tiempo estándar

Tiempo estándar (en periodos de 15 minutos) de acuerdo con el procedimiento y cirujano.

Ilustración 13 se presenta la hoja del aplicativo que contiene las instrucciones para su uso.

INSTRUCCIONES APLICATIVO

El presente aplicativo busca determinar la programación operativa de las salas de cirugía de una clínica de cuarto nivel en Colombia, buscando minimizar la tardanza.
Desarrollado por Alejandro Rivera, Angella Moreno y Camilo Zuleta, estudiantes de Ingeniería Industrial de la Pontificia Universidad Javeriana.

EJECUCIÓN APLICATIVO	INFORMACIÓN DE ENTRADA
<p>Programa</p> <p>Los resultados de la programación se encuentran en la hoja "Programa" de este documento. Esta hoja está compuesta por un cuadro de mando, parámetros de entrada, horario que muestra el ID de las cirugías de la programación sugerida, indicadores de la programación y simulación.</p> <p>Cuadro de mando</p> <p> <input type="button" value="EDD - 7 salas"/> <input type="button" value="AG - 7 salas"/> <input type="button" value="EDD - 6 salas"/> <input type="button" value="AG - 6 salas"/> <input type="button" value="Factibilidad"/> <input type="button" value="Borrar"/> <input type="button" value="Restricciones"/> </p> <p> <input checked="" type="checkbox"/> Horario Cirujano <input checked="" type="checkbox"/> Utilización Sala <input checked="" type="checkbox"/> Cirujano-Sala <input checked="" type="checkbox"/> Equipos especiales <input checked="" type="checkbox"/> Simulación </p> <p>Factibilidad</p> <p>Revisa que no existan conflictos de cirugías y tiempos de la programación.</p> <p>Borrar</p> <p>Botón que borra las celdas de resultados de programación.</p> <p>Restricciones</p> <p>Al marcar cada Checkbox activa las siguientes restricciones: Horario-cirujano: cada cirujano está habilitado para operar en determinadas franjas horarias, esta restricción es actualizada mensualmente por los directivos y jefes de salas de cirugía. Utilización sala: cada sala puede ser ocupada por cirugías programadas</p>	<p>La información de entrada, requerida para la lectura de datos de la programación.</p> <p>Especialidades</p> <p>Lista de especialidades que son parte de la programación.</p> <p>Cirujanos</p> <p>Lista de cirujanos disponibles, su asignación de identificadores y de especialidades.</p> <p>Procedimientos</p> <p>Lista de procedimientos y su asignación de identificadores. Tiempos históricos de los procedimientos</p> <p>Cirugías</p> <p>Lista de cirugías pendientes a programar, su asignación de identificadores, cirujanos, procedimientos y</p> <p>Sudoku</p> <p>Horario (por bloques) de los cirujanos y especialidades asignados a cada sala.</p> <p>Sudoku ID</p> <p>Horario (por bloques) de los identificadores de los cirujanos y especialidades asignados a cada sala.</p> <p>Tiempo estándar</p> <p>Tiempo estándar (en periodos de 15 minutos) de acuerdo con el procedimiento y cirujano.</p>

Ilustración 13. Instrucciones del aplicativo

5.3. Requerimientos de desempeño

A continuación, se mencionan los requerimientos definitivos identificados en el desarrollo del aplicativo.

Requerimientos funcionales:

- Dar respuesta a la planeación de sala de cirugías con un horizonte de programación de siete días.
- Mostrar los siguientes indicadores de desempeño: porcentaje de utilización promedio de las salas, porcentaje de cirugías reprogramadas semanalmente y porcentaje de cumplimiento en la programación inicial.

Requerimientos No Funcionales:

- Considerar los parámetros, restricciones y variables de decisión identificados como necesarios y pertinentes del proceso actual.

- La planeación resultante de la ejecución del aplicativo debe ser factible y aplicable al contexto real de la clínica.
- El aplicativo debe ser reactivo, es decir, si hay cambios en las necesidades de la clínica se pueden hacer reprogramaciones de las cirugías, teniendo en cuenta el efecto logístico de la reprogramación.
- El aplicativo será intuitivo y fácil de usar por parte de los funcionarios encargados del proceso de programación de salas de cirugías.

El requerimiento identificado durante proyecto de grado: *"Reprogramar una cirugía a un espacio libre teniendo cuenta la máxima fecha de programación de acuerdo con el tipo de prioridad asignado"* no es aplicable al alcance del aplicativo, debido a que esta herramienta se centra en la programación de las cirugías a futuro y una reprogramación sólo se identifica una vez se ejecute lo programado.

5.4. Pruebas de rendimiento

En primer lugar, es fundamental resaltar que a lo largo del desarrollo del proyecto se realizaron reuniones periódicas con los funcionarios de la clínica que participan en el proceso, las cuales permitieron afianzar los conceptos y entender el proceso actual de programación de cirugías y así modelarlo de acuerdo con las principales variables y parámetros identificados. Por otro lado, los funcionarios fueron evaluadores del criterio "necesidad" en el método de ponderación de factores. Adicionalmente, para este proyecto se llevaron a cabo las siguientes pruebas:

- Una prueba de estrés para medir el punto hasta el cuál responde el modelo de programación lineal en Gusek. Se identificó la necesidad de plantear un tipo de solución más robusta puesto que el modelo de programación lineal no fue capaz de encontrar una solución para una cantidad de cirugías mayor a 40.
- Para validar el requerimiento de reactividad se plantearon dos escenarios de programación y simulación.
- Para comparar los resultados y los indicadores resultantes de cada caso de programación se hicieron pruebas con la regla de despacho EDD y con el algoritmo genético para medir la variación de los indicadores de solución de cada uno.
- Para permitir que los usuarios puedan comprender y utilizar fácilmente el aplicativo se ha desarrollado un manual en el archivo en el cual se indican los pasos y recomendaciones a tener en cuenta.

Los resultados de estas pruebas se encuentran detalladamente en el capítulo 6.

5.5. Restricciones

Para este proyecto se deberá contar con la siguiente información:

- El conjunto de cirugías de pacientes: especialidad, procedimiento, tipo de prioridad y cirujano asignado.
- El conjunto de cirujanos disponibles con su respectiva especialidad y procedimientos.
- La cantidad de salas de cirugía existentes y la(s) especialidad(es) que puede(n) realizarse en cada una.
- Este proyecto se enfocará única y exclusivamente en cirugías de naturaleza electiva. Estas cirugías son informadas con anterioridad al momento de su programación y no constituyen casos donde el paciente llega al área de urgencia y deba ser operado inmediatamente.
- Cada cirugía debe ser programada en un intervalo de tiempo ininterrumpido, de manera que la cirugía sea cumplida en su totalidad sin que se exceda el horario de trabajo del cirujano.

Adicionalmente, durante el desarrollo del trabajo de grado se han planteado las siguientes restricciones: horario de cada cirujano, asignación de sala a cada cirujano, porcentaje máximo de utilización de salas y disponibilidad de equipos especiales. Además, el aplicativo cuenta con la funcionalidad de revisión de

factibilidad de la solución expuesta, verificando que no existan conflictos entre el inicio de las cirugías, que un cirujano no opere al mismo tiempo en dos salas diferentes, que la cirugía sea asignada solamente una vez y que las cirugías que se van a efectuar tengan su fecha de programación dentro del horizonte estipulado de 1 semana y evalúa la correcta asignación del tiempo de preparación que depende de la especialidad.

5.6. Cumplimiento del estándar

Debido a que este proyecto requirió el manejo, depuración y análisis de datos, se ha utilizado y aplicado la metodología CRISP-DM (Cross Industry Standard Process for Data Mining), la cual otorga un lineamiento estructurado para ejecutar efectivamente un proyecto de minería y análisis de datos. CRISP-DM también abarca las principales fases de un proyecto, sus respectivas actividades y tareas específicas.

Teniendo en cuenta esta estructura de fases, las actividades del proyecto relacionadas con el tratamiento de datos se han clasificado en las siguientes etapas: en primer lugar, se analizó el proceso de programación de cirugías a través de las visitas y reuniones con los funcionarios de la clínica. Segundo, se han recibido los datos históricos de ejecución de cirugías por parte de estos funcionarios. Tercero, se han depurado y organizado estos datos para proceder con el análisis. Posteriormente, se han modelado y han sido analizados a través de la metodología descrita en el capítulo 4 para establecer los tiempos estándar por cirujano y procedimiento. Finalmente se han evaluado estos resultados y se incorporaron como parámetros de entrada del aplicativo.

La metodología del Proceso Racional Unificado (Rational Unified Process - RUP) es ampliamente personalizable y esto permitió su adaptación a la gestión de este proyecto, que se centra en el desarrollo de una aplicación. Ésta proporciona una solución disciplinada a través de la asignación de responsabilidades y tareas a los miembros que conforman este equipo de trabajo de grado. De las cuatro 4 fases que componen esta guía de proyectos, se aplicaron tres de ellas: iniciación, elaboración y construcción. A través del levantamiento de información y requerimientos del negocio se alcanzó la fase introductoria pues se estableció la planificación y se especificaron los objetivos y alcance del proyecto; a continuación, se propuso el diseño y características del producto final, y por último se procedió al desarrollo físico y pruebas del aplicativo. Se utilizó la herramienta de seguimiento MeisterTask (software gratuito en línea) [referencia] que permitió llevar un control y seguimiento de las tareas asignadas a cada integrante del equipo en cada fase del Proyecto.

6. Resultados

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos que evidencian el cumplimiento de cada uno de los objetivos específicos planteados en el inicio de este trabajo de grado.

6.1. Resultados de selección de factores

Para determinar los parámetros y restricciones que fueron parte del aplicativo se ejecutó un método de ponderación de factores. En la *Tabla 5* se puede apreciar las calificaciones según los criterios (proceso actual o innovación, viabilidad y necesidad) y la calificación ponderada que cada factor obtuvo.

<i>Factor</i>	<i>Variable</i>	<i>Proceso actual o innovación (34%)</i>	<i>Viabilidad (33%)</i>	<i>Necesidad (33%)</i>	<i>Calif.</i>
<i>Origen de la cirugía</i>	Electiva (15 a 60 días)	5	5	5	5
	Prioritaria (2-3 días)	1	1	1	1
	Urgencia (Menos de 3 horas)	1	1	1	1
<i>División horarios Cirujano/Horario Cirujano/Sala Sala/Especialidad</i>	Bloques de 6 horas	4	5	5	4.66
	Cada cirujano tiene un horario	5	5	5	5
	Cada cirujano tiene sala asignada.	5	5	5	5
	Sala 1: Cirugías contaminadas	5	5	5	5
	Sala 2: Cirugías contaminadas	5	5	5	5
	Sala 3: Cirugías contaminadas	5	5	5	5
	Sala 4: Cesáreas y legrados	1	1	1	1
	Sala 5: Urgencias	1	1	1	1
	Sala 6: Cirugías	5	5	5	5
	Sala 7: Cardio	5	5	5	5
<i>Ciruj./Especialidad Proced./Especialidad</i>	Sala 8: Reemplazos artic. columna	5	5	5	5
	Sala 9: Cirugías	5	5	5	5
	Cada cirujano tiene especialidad	5	5	5	5
	Cada procedimiento tiene su especialidad	5	5	5	5
	<i>Cubículos</i>	21 cubículos de recuperación	3	3	5
<i>Tiempo de cirugía</i>	Tiempo procedimiento por cirujano	4	4	5	4.33
	Tiempo por procedimiento	4	4	4	4
	Tiempo por especialidad	4	2	2	2.68
<i>Equipos médicos</i>	Todos los equipos	1	2	5	2.65
	Equipos críticos	5	3	4	4.01
<i>Cambio equipos Médico/Paciente</i>	Toma un tiempo de 2-3 horas	2	1	4	2.33
	Médico tiene paciente asignado	5	5	5	5
<i>Tiempo de desinfección y alistamiento</i>	Tiempo por procedimiento	4	2	3	3.01
	Tiempo por especialidad	4	5	3	4
	Tiempo promedio general	1	4	3	2.65
<i>Disponibilidad del paciente</i>	Si el paciente puede asistir a la hora asignada	4	1	5	3.34
	<i>Valoración</i>	2 horas antes de la cirugía	1	1	4
<i>Porcentaje de ocupación de salas</i>	90%	4	5	4	4.33
	85%	5	5	5	5
	80%	4	5	4	4.33
<i>Alcance program.</i>	Diario	5	5	5	5

Tabla 8. Resultados del Método de Ponderación de Factores

De los 34 factores tenidos en cuenta para este proceso, 22 obtuvieron la calificación para ser definidos como determinantes en la programación, 3 son considerados como posibles componentes del aplicativo y 9 no se tomaron en cuenta. En la tabla precedente se resaltan en negrilla los factores seleccionados, dado que obtuvieron una calificación mayor o igual a 4. Para ver la versión completa dirigirse a Anexo 2.

6.2. Resultados de análisis de datos

En el Anexo 3 se puede apreciar con detenimiento los datos de entrada, criterios y resultados de tiempos estándar descritos en esta sección.

6.2.1. Resultados distribuciones de probabilidad por procedimiento

Luego de la depuración de registros históricos se obtuvieron 22.076 cirugías, clasificadas en 220 tipos de procedimientos, realizados por 211 cirujanos que están asignados a una de 35 especialidades. Utilizando el software de FlexSim, se establecieron las distribuciones de probabilidad que mejor se ajustan a cada tipo de procedimiento. El software identificó una distribución para cada tipo de procedimiento que tuviera una cantidad

de cirugías mayor o igual a 30 observaciones; para los casos que no cumplieron con esta condición se asignaron distribuciones empíricas. En la Tabla 9 se presentan las distribuciones asignadas por procedimiento.

<i>Tipo distribución</i>	<i>Cantidad Procedimientos</i>	<i>Porcentaje respecto del total (%)</i>
<i>Empirical</i>	91	41.36
<i>Log Logistic E</i>	36	16.36
<i>Log Logistic</i>	18	8.18
<i>Otras</i>	64	34.09
Total general	220	100.00

Tabla 9. Distribuciones de los procedimientos

6.2.2. Resultados Análisis de tiempo estándar por procedimiento

Se calcularon los tiempos estándar por procedimiento de acuerdo con la metodología especificada en la Tabla 3. La asignación de estos tiempos se generó de acuerdo con los estimadores presentados en la Tabla 10.

<i>Estimador Tiempo Estándar por procedimiento</i>	<i>Cantidad de procedimientos</i>	<i>Porcentaje respecto del total (%)</i>
<i>Media</i>	128	58.18
<i>Mediana</i>	34	15.45
<i>Percentil 60</i>	45	20.45
<i>Percentil 70</i>	13	5.91
Total general	220	100.00

Tabla 10. Resultados de tiempos estándar asignados

6.2.3. Resultados análisis por procedimiento y cirujano

Para el análisis de tiempos estándar por procedimiento y cirujano, se determinaron 2.671 pares de especialista-tipo de cirugía. De este total, en 1.874 pares el análisis de varianza concluyó que el cirujano es estadísticamente significativo en la variación de los tiempos del procedimiento. Además, de estos casos en 1.656 pares el procedimiento es representativo pues tiene 30 o más observaciones dentro del conjunto de datos históricos. El detalle de este resultado se encuentra en la Tabla 11.

<i>Significancia por par</i>	<i>Pares Procedimiento y Cirujano</i>	<i>Porcentaje respecto del total (%)</i>
<i>Es significativo el cirujano</i>	1874	70.16
<i>Procedimiento no representativo</i>	218	8.16
<i>Representativo</i>	1656	62.00
<i>No es significativo el cirujano</i>	797	29.84
<i>Procedimiento no representativo</i>	341	12.77
<i>Representativo</i>	456	17.07
Total general	2671	100.00

Tabla 11. Resultados del análisis por procedimiento y cirujano

6.3. Resultados de modelo de programación lineal

Para medir la efectividad y grado de respuesta del modelo matemático de programación lineal se procedió a implementarlo en el software Gusek y realizar una prueba de estrés. Esta prueba consistió en validar en diferentes instancias y determinar el tiempo que tardaba el software en encontrar y en imprimir la solución óptima del modelo. Posteriormente, se comparó dicha instancia con los parámetros y conjuntos reales para concluir si el modelo funciona. Además, se tuvo en cuenta el siguiente supuesto: los primeros 15 días hacen parte del periodo de radicación de las cirugías y los siguientes 7 conforman el horizonte de programación.

Como se puede identificar en la siguiente tabla, esta prueba de estrés tuvo en cuenta 10 iteraciones, en las cuales se incrementaba la cantidad de parámetros y variables principales y se registraba el tiempo de ejecución luego del cual Gusek mostraba la solución y resultado de la función objetivo. Después de la novena prueba, el modelo no encuentra el óptimo en un tiempo razonable; en la décima prueba la solución no se encontró después de 24 horas de búsqueda. En la Tabla 12 se muestran los resultados de la prueba.

Prueba	Cantidad salas	Cantidad cirugías	Cantidad días	Cantidad periodos por día	Cantidad cirujanos	Cantidad equipos especiales	Cantidad especialidades	Tiempo de ejecución (segundos)
1	2	5	2	12	2	2	2	0.32
2	3	10	3	12	3	2	4	0.56
3	3	10	3	24	3	2	4	1.21
4	4	10	5	24	4	2	4	3.93
5	4	15	5	24	4	3	4	12.648
6	7	15	7	24	5	3	5	14.5
7	7	20	7	24	5	3	5	19.7
8	7	30	7	24	5	3	5	32.6
9	7	40	7	24	5	3	5	2 horas 11 minutos
10	7	45	7	24	7	4	5	No encuentra la solución en 24 horas

Tabla 12. Resultados prueba de estrés

Considerando que el equipo de programadores requiere una herramienta que determine resultados en un corto tiempo y que se tiene una gran cantidad de cirugías a programar, se concluye que un modelo de programación lineal no es la estrategia adecuada para solucionar este problema. Por lo tanto, es necesario plantear un escenario y metodología de solución más robusto. Debido a que se ha demostrado que el óptimo global no será encontrado fácilmente, se procedió a utilizar metodologías de óptimos locales, como lo son heurísticas y/o metaheurísticas.

6.4. Resultados de programación de casos

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la programación de salas de cirugía para cada uno de los casos propuestos en el diseño y explicados a profundidad en el protocolo de validación del proyecto para el horizonte temporal de una semana. Estos resultados se muestran por cada uno de los indicadores de desempeño considerados en el proyecto.

Indicadores	EDD C1	EDD C2	EDD C3	EDD C4	EDD C5	AG C1	AG C2	AG C3	AG C4	AG C5
Función objetivo	786	776	620	604	521	763	784	609	595	508
Cantidad de cirugías programadas	146	152	188	188	178	153	158	191	195	189
Porcentaje de cirugías programadas	8%	8%	10%	10%	10%	8%	9%	10%	11%	10%
Cantidad de cirugías programadas sin tardanza	105	110	94	93	95	116	124	100	109	119
Porcentaje de cirugías programadas sin tardanza	72%	72%	50%	49%	53%	76%	78%	52%	56%	63%
Cantidad de cirugías programadas con tardanza	41	42	94	95	83	37	34	91	86	70
Porcentaje de cirugías programadas con tardanza	28%	28%	50%	51%	47%	24%	22%	48%	44%	37%
Promedio de utilización de las salas	64%	67%	80%	84%	82%	65%	66%	80%	83%	82%
Tiempo computacional (segundos)	2.12	1.99	2.05	2.05	1.9	42.95	35.96	34.91	26.74	73.59

Tabla 13. Resultados indicadores de programación

Los resultados más representativos de esta tabla son:

- El caso que obtuvo la mejor función objetivo ha sido el AG C5 con 508 días de tardanza.
- La mayor de cantidad de cirugías programadas y su porcentaje respecto al total de cirugías pendientes por programar se evidenció en el AG C4 con 195 cirugías y una participación del 11% sobre el total.

- El AG C2 se destacó por tener la mayor cantidad y porcentaje de cirugías sin tardanza respecto del total de cirugías programadas con 124 cirugías que corresponden al 78%. De igual manera este caso presenta la menor cantidad y porcentajes de cirugías programadas con tardanza.
- El mayor porcentaje de ocupación promedio de las salas fue obtenido por el EDD C4 con el 84%.
- El tiempo computacional requerido para obtener la solución es ostensiblemente menor en los casos que involucren EDD respecto a los casos del algoritmo genético. Cabe resaltar que los tiempos del AG son razonables para obtener una mejor solución.

6.5. Resultados de simulación de escenarios

En la siguiente tabla, se presentan los resultados obtenidos de la simulación de la ejecución de la programación de salas de cirugía para cada uno de los casos propuestos en el diseño y explicados a profundidad en el protocolo de validación (ver Anexo 7) del proyecto para el horizonte temporal de una semana.

Indicadores	EDD C1	EDD C2	EDD C3	EDD C4	EDD C5	AG C1	AG C2	AG C3	AG C4	AG C5
Cirugías ejecutadas	144	145	185	184	175	151	150	188	190	185
Porcentaje de cirugías ejecutadas	98%	95%	98%	98%	98%	99%	95%	98%	98%	98%
Cirugías reprogramadas	2	7	3	10	3	2	8	3	11	4
Porcentaje de cirugías reprogramadas	2%	5%	2%	5%	2%	1%	5%	2%	5%	2%
Porcentaje de utilización de salas	56%	56%	69%	71%	71%	56%	56%	69%	71%	71%

Tabla 14. Resultados indicadores de simulación

Los resultados más representativos de esta tabla son:

- El caso AG C4 presenta la mayor cantidad promedio de cirugías ejecutadas con 194 cirugías.
- El mejor porcentaje promedio de ejecución de cirugías es obtenido por el AG C1 con el 99%. De igual manera este caso se caracteriza por tener la menor cantidad y porcentaje de cirugías reprogramadas con 2 cirugías, que representan el 1% del total.
- El mayor nivel promedio de utilización de salas es alcanzado por casos tanto del EDD como del AG con el 71%.

7. Conclusiones y recomendaciones.

Teniendo en cuenta los resultados de los indicadores de desempeño, tanto de programación como de simulación, se puede concluir que los diferentes casos del escenario 1, en donde se programan cirugías en las siete salas (escenario de programación actual), obtienen mejores soluciones que en los casos donde se deja una sala vacía para absorber las posibles reprogramaciones (escenario 2); por lo tanto, se descarta la idea propuesta de dejar una sala vacía para reprogramaciones debido a que este escenario aumenta considerablemente la cantidad de cirugías reprogramadas, impactando en el nivel de servicio al paciente.

Se evidenció que al aplicar la metaheurística formulada, algoritmo genético, se obtienen mejores soluciones con respecto al uso de la regla de despacho EDD, que corresponde a una aproximación del proceso de programación de la clínica. El mejor caso de programación es aquel donde se aplica el algoritmo genético para programar la totalidad de las salas sin tener en cuenta ninguna restricción de horario, cirujano o sala (caso AG C5), porque obtuvo la menor función objetivo, programa una alta cantidad de cirugías, tiene un porcentaje bajo de tardanza y una alta utilización de las salas. Se demuestra que entre menor cantidad de restricciones contemple el modelo, mejor será la función objetivo de la solución; por lo tanto, el supuesto de condicionar un cirujano a una sala de cirugía impide la obtención de mejores soluciones. En la simulación, el mejor caso de ejecución es el que aplica el algoritmo genético teniendo en cuenta la totalidad de salas para su programación y las restricciones de horario de cirujanos y salas (caso AG C1), pues contó con el menor porcentaje de cirugías reprogramadas.

La inclusión del simulador en el aplicativo representa un valor agregado que permite pronosticar el comportamiento de ejecución de cirugías en la semana estipulada y de esta manera, validar la calidad de la

planeación generada por la aplicación mediante indicadores de desempeño. A través de esta funcionalidad se validó el supuesto planteado por los funcionarios de la clínica de mantener un 85% de utilización máximo por cada sala, logrando minimizar el riesgo de reprogramaciones y proporcionar un espacio para cirugías prioritarias.

Del análisis de datos históricos se concluye que, en el 70.2% de los casos, el cirujano es un factor estadísticamente significativo para la variación de la duración de los tiempos quirúrgicos por tipo de procedimiento; por lo tanto, se acepta la hipótesis inicial propuesta. Además, dicho análisis permitió el cálculo cuantitativo de los tiempos quirúrgicos estándar por cirujano-procedimiento; de esta manera, los funcionarios que participan en el proceso de programación tendrán una base robusta y con menor incertidumbre para estimar la duración de cirugías a programar.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el desarrollo, se proponen las siguientes recomendaciones:

Como estrategia de programación se propone mantener la restricción del horario del cirujano y no tener en cuenta aquella que fija el cirujano a operar en una determinada sala cada día. De esta manera, se respetan los horarios de trabajo de cada cirujano permitiendo flexibilidad en la programación y un mayor porcentaje de utilización de las salas. Teniendo en cuenta que los resultados arrojaron casos diferentes como mejores escenarios de programación y de simulación, se recomienda utilizar el aplicativo bajo la configuración del caso que aplica el algoritmo genético en la programación de la totalidad de salas y únicamente tiene en cuenta la restricción de horario por cirujano (caso AG C3).

Por último, la clínica podrá hacer uso de los tiempos quirúrgicos estándar de los procedimientos por cirujano, identificados en el análisis, para integrarlos en los procesos y toma decisiones donde pueda requerirse esta información. Sin embargo, estos tiempos pueden estar sujetos a cambios. En este sentido, la clínica podría mejorar la calidad de su proceso de recolección de datos de cirugías para obtener mayor confiabilidad de esta información para un posterior análisis estadístico. Se recomienda no permitir campos de llenado manual, tener categorías predeterminadas para cirujanos, especialidades y procedimientos.

8. Agradecimientos

Expresamos nuestros agradecimientos a los ingenieros Javier García y Julián Rojas, los cuales permitieron el contacto entre clínica y este grupo de trabajo. Al doctor David Rincón, la jefa de enfermeras Leticia, los funcionarios de la clínica por la atención brindada durante el proceso de construcción de este proyecto, diversas reuniones e información suministrada.

Por último, queremos agradecer a los directores de este trabajo de grado por su invaluable apoyo, consejo y asesoría que fueron de gran aporte.

9. Glosario

A continuación, se encontrará el conjunto de conceptos más relevantes para el desarrollo de este proyecto, y sus respectivas definiciones:

- **Aplicativo de software:** es un programa informático diseñado para ejecutar tareas o procesos, permitiéndole al usuario desempeñar su trabajo de forma más eficaz. Se compone de un conjunto de entradas, lógica de procesamiento de la información y despliegue de resultados específicos por medio de una interfaz. (Campos Hernández, Espinosa Casallas, Gutiérrez Leguízamo, & Martínez Cadavid, 2011)
- **Bloques de salas de cirugía:** Son intervalos de tiempo definidos previamente que permiten la asignación de cirugías según el tiempo estimado de esta. (Rafaliya, N, Fazle Baki, & Chaouch, 2015)
- **Especialidad de cirugía:** Es el término que se usa para reunir en una sola familia al conjunto de procedimientos quirúrgicos que se realizan a un órgano/enfermedad en específico. (Guido & Conforti, 2015)

- **Metaheurística:** es un método de solución de un problema matemático en el cual se estructura una metodología y se establece una búsqueda iterativa para identificar posibles soluciones del mismo, y este método funcionará hasta que se cumpla el criterio de parada o búsqueda- (Aringhieri, Landa, Soriano, Tànfani, & Testi, 2015)
- **Pacientes de urgencias:** son aquellos pacientes que presentan una condición médica tal que debe ser atendida de inmediato. En caso de requerir un procedimiento quirúrgico, el área de programaciones asignará una sala de manera urgente para su ejecución y cancelará (de ser necesario una cirugía para un paciente electivo que se encuentre agendado en esa sala y horario). (Cardoen, Demeulemeester, & Beliën, 2009)
- **Pacientes electivos:** son aquellos pacientes que llegan a la clínica y solicitan la realización de una cirugía luego de recibir una aprobación médica. Esta cirugía no debe ejecutarse inmediatamente y puede ser asignada dependiendo de su nivel de prioridad. (Cardoen, Demeulemeester, & Beliën, 2009)
- **Prioridad de cirugía:** es el conjunto de categorías que definen la importancia de una cirugía y determina en cuál intervalo de tiempo debe ser realizada. (van Oostrum, y otros, 2006)
- **Programación a nivel estratégico:** es el tipo de programación en el cual se determina la cantidad de salas de cirugía, los cirujanos y las especialidades que deben tenerse en cuenta para la posterior asignación de procedimientos quirúrgicos y pacientes. (Aringhieri, Landa, Soriano, Tànfani, & Testi, 2015)
- **Programación a nivel operativo:** es el tipo de programación en el cual se toman las salas, cirujanos y bloques de tiempo definidos previamente y se procede a asignarles las cirugías y sus respectivos pacientes dentro del horizonte temporal definido para esta programación. (Aringhieri, Landa, Soriano, Tànfani, & Testi, 2015)
- **Programación a nivel táctico:** es el tipo de programación en el cual se designan bloques de tiempo (times slots) para cada sala, de acuerdo con el criterio de asignación (ya sea por cirujano, por especialidad, etc.) y se relaciona con la información suministrada en la programación estratégica. (Aringhieri, Landa, Soriano, Tànfani, & Testi, 2015)
- **Programación de cirugías:** el proceso de definir la secuencia y el tiempo de ocurrencia de las actividades de una cirugía. (Cardoen, Demeulemeester, & Beliën, 2009)
- **Programación determinística:** es la programación de cirugías que toma las decisiones sin tomar en cuenta el factor de la incertidumbre, que se ve evidenciado en la duración de las cirugías, reprogramaciones, cancelaciones, etc. (Cardoen, Demeulemeester, & Beliën, 2009).
- **Programación estocástica:** es la programación de cirugías que toma las decisiones tomando en cuenta el factor de incertidumbre, y asignando distribuciones de probabilidad y de ocurrencia de los elementos que se identifican dentro de dicho factor. (Cardoen, Demeulemeester, & Beliën, 2009)
- **Recursos físicos de una sala:** Es el conjunto de elementos, insumos e instrumentos que deben estar presentes en una sala de cirugía para poder realizar un determinado procedimiento quirúrgico. (Cardoen, Demeulemeester, & Beliën, 2009)

10. Tabla de Anexos o Apéndices

<i>No. Anexo</i>	<i>Nombre</i>	<i>Desarrollo</i>	<i>Tipo de Archivo</i>	<i>Relevancia para el documento (1-5)</i>
1	Diagrama de proceso programación de cirugías	Propio	Imagen (.png)	1
2	Método cuantitativo de factores	Propio	Excel (.xlsx)	4
3	Análisis de datos	Propio	Excel (.xlsx)	5
4	Modelo de programación lineal y Prueba de estrés	Propio	PDF	5
5	Modelo de programación lineal Gusek	Propio	Carpeta comprimida (.rar)	5
6	Aplicativo programación salas de cirugía	Propio	Excel (.xlsm)	5
7	Protocolo de validación	Propio	PDF	4
8	Carta de confidencialidad	Clínica	PDF	5

Referencias

Adan, I., Bekkers, J., Dellaert, N., Jeunet, J., & Vissers, J. (2011). Improving operational effectiveness of tactical master plans for emergency and elective patients under stochastic demand and capacitated resources. *European Journal of Operational Research*, 290-308.

Allen, R., Taaffe, K., & Ritchie, G. (2014). Surgery rescheduling using discrete event simulation: a case study. *IEEE Press*, 1365-1376.

Aringhieri, R., Landa, P., Soriano, P., Tànfani, E., & Testi, A. (2015). A two level metaheuristic for the operating room scheduling. *Computers*, 21-34.

Campos Hernández, G., Espinosa Casallas, D., Gutiérrez Leguízamo, P., & Martínez Cadavid, F. (2011). Digital TV in Colombia: A possibility to design interactive applications. *Revista Tecnología*, 85-91.

Cardoen, B., Demeulemeester, E., & Beliën, J. (2009). Operating room planning and scheduling: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 921-932.

Chiu, S., Cheng, C.-B., Cheng, C.-J., & Wu, J.-Y. (2011). Customer lifetime value prediction by a Markov chain based data. *Sharif University of Technology - Scientia Iranica*, 849-855.

Dexter, F., & Traub, R. (2002). How to Schedule Elective Surgical Cases into Specific Operating Rooms to Maximize the Efficiency of Use of Operating Room Time. *Anesthesia & Anesthesia*, 933-942.

Dinero.com. (23 de Junio de 2016). *Crecen los usuarios de medicina prepagada en el país*. Obtenido de Dinero.com: <http://www.dinero.com/edicion-impresa/sectores/articulo/aumenta-el-numero-de-usuarios-de-medicina-prepagada/224917>

F, L., Gupta, D., & Potthoff, S. (2013). Improving Operating Room Schedules. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2357535>

Guido, R., & Conforti, D. (2015). A hybrid genetic approach for solving an integrated multi-objective operating room planning and scheduling problem. Calabria: Elsevier Ltd.

Guo, M., Wu, S., Song, J., & Rong, Y. (2014). Integrated scheduling of elective surgeries and surgical nurses for operating room suites. *Science and Business Media*, 166-181.

Meskens, N., Duvivier, D., & Hanset, A. (2012). "Multi-objective operating room scheduling considering desiderata of the. *Decision Support Systems*, 650-659.

Metodoss.com (2018). *Metodología RUP*. Obtenido de Metodoss.com: <https://metodoss.com/metodologia-rup/>

Paz, R. C., & Gómez, D. G. (2012). Localización de instalaciones. *Buenos Aires*, 27, 28-30.

Pham, D., & Klinkert, A. (2008). Surgical case scheduling as a generalized job shop scheduling problem. *European Journal of Operating Research*, 1011-1025.

Rafaliya, N., N, X., Fazle Baki, M., & Chaouch, B. (2015). Scheduling elective surgeries: the tradeoff among bed capacity, waiting patients and operating room utilization using goal programming. *Health Care Magazine*, 33-54.

Rational Co. (11 de 2001). *IBM*. Recuperado el 28 de Octubre de 2017, de IBM Website: https://www.ibm.com/developerworks/rational/library/content/03July/1000/1251/1251_bestpractices_TP026B.pdf

Reddy Gunna, V., Abedini, A., & Li, W. (2017). Maximizing operating room performance using portfolio selection. *Science Direct*, 83-91.

Román, J. V. (2016 de 08 de 2016). *Singular Data & Analytics*. Recuperado el 28 de Octubre de 2017, de CRISP - DM: <https://data.sngular.team/en/art/40/crisp-dm-the-methodology-to-put-some-order-into-data-science-projects>

Saadouli, H., Jerbi, B., Dammak, A., Masmoudi, L., & Abir, B. (2014). A stochastic optimization and simulation approach for scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, 72-79.

Salud, M. d. (1994). Resolución Numero 5261 de 1994.

Spangler, W., Strum, D., Vargas, L., & May, J. (2004). Estimating Procedure Times for Surgeries. *Health Care Management Science*, 97-104.

Van Oostrum, J., Van Houdenhoven, M., Hurink, J., Hans, E., Wullink, G., & Kazemier, G. (2006). A master surgical scheduling approach for cyclic scheduling in operating room departments. *QR Spectrum*, 355-374.

Xiang, W., Yin, J., & Lim, G. (2012). An ant colony optimization approach for solving an operating room. *Computers & Industrial Engineering*, 335-345.

Ya Liu, C. C., Liu, Y., Chu, C., & Wang, K. (2010). A new heuristic algorithm for the operating room scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, 865-871.

Abdeljaouad, M. A., Saadani, N. E. H., & Bahroun, Z. (2014, November). A dichotomic algorithm for an operating room scheduling problem. In *Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), 2014 International Conference on* (pp. 134-139). IEEE.