

Desarrollo de Herramientas de Soporte a la Toma de Decisiones en el Servicio de Quirófanos del Hospital Municipal “Dr. Leónidas Lucero” de Bahía Blanca

Aníbal M. Blanco¹, Graciela A. Moreno², M. Celeste Kees¹, J. Alberto Bandoni¹, Nebel S. Moscoso², Fernando Lago², Analía Ocampo³, Marcos Durando³, Helena Briatore², Fiorella Mezzanotte², M. Susana Moreno¹

¹ Planta Piloto de Ingeniería Química - PLAPIQUI (UNS – CONICET)
{ablanco, abandoni, smoreno}@plapiqui.edu.ar

² Instituto de Investigaciones Económicas y Sociales del Sur - IIESS (UNS – CONICET),
{nmoscoso1, ferlago72}@gmail.com

³ Hospital Municipal de Agudos Dr. Leónidas Lucero, Bahía Blanca, Argentina
analiavocampo@gmail.com

Resumen. La cirugía es una de las actividades más importantes desarrollada en los hospitales debido principalmente al impacto que brinda sobre la calidad de vida de los pacientes. Adicionalmente, una gran cantidad de recursos humanos, económicos y materiales se encuentran afectados al desarrollo de esta actividad. Por estas razones, la organización eficiente del servicio de quirófanos es una de las prioridades de sus responsables. Esta actividad puede verse beneficiada por la adopción de herramientas computacionales, basadas en modelos matemáticos de optimización, que ayuden en la planificación de las cirugías programadas. En este trabajo se describe una herramienta de estas características, que se encuentra en desarrollo en el marco de un proyecto DETEM (Desarrollo Tecnológico Municipal), para el hospital municipal de la ciudad de Bahía Blanca. El objetivo del proyecto es generar un software basado en un modelo de planificación óptima que proporcione un programa factible de cirugías para los próximos días y permita estudiar sistemáticamente el sistema identificando cuellos de botella y oportunidades de mejora.

Palabras clave: Servicio quirófanos, Hospital municipal, Bahía Blanca, Cirugías programadas, DETEM.

1 Introducción

La gestión del servicio de quirófanos en los hospitales es una actividad desafiante, que requiere la coordinación de numerosos recursos humanos y materiales, con el objetivo principal de realizar, en tiempo y forma, las cirugías programadas para restablecer la salud y garantizar la calidad de vida de los pacientes en el mediano y largo plazo. Típicamente, los hospitales de media y alta complejidad ofrecen cirugías en una variedad de especialidades y disponen de un conjunto de quirófanos con determinado tipo de equipamiento para su realización. Los recursos humanos asociados al servicio

comprenden uno o varios cirujanos por especialidad, anesestesiólogos, enfermeros, camilleros y personal de limpieza y administrativo. Desde un punto de vista operativo las cirugías se clasifican en urgentes y programadas. Las primeras están asociadas a emergencias y requieren atención inmediata mientras que, las cirugías programadas son aquellas que, con mayor o menor perentoriedad, pueden planificarse para ser realizadas en un futuro cercano. Este trabajo se enfoca exclusivamente en estas últimas. Por lo general, cada especialidad posee una lista de pacientes en espera para ser intervenido con una cierta prioridad de atención. El desafío de los administradores del servicio es planificar la realización de la mayor cantidad posible de cirugías durante los próximos días, mediante la coordinación del personal, las instalaciones, y la aparatología disponible.

Cabe aclarar que, si bien existen muchos aspectos en común, cada institución posee una organización particular del servicio de quirófanos, que depende de si se trata de un hospital público o privado, si es de gestión municipal o provincial, si es un hospital grande o pequeño, etc. Estas variantes están en muchos casos determinadas por la forma en que tradicionalmente ha venido organizándose el servicio, por la dinámica interpersonal entre sus miembros y por la disponibilidad de recursos, entre muchos otros factores.

Tradicionalmente, la planificación del servicio de quirófanos la realizan profesionales experimentados que conocen perfectamente las características de su sector y que, basados en ciertos protocolos existentes y en su propia experiencia e intuición, van organizando el cronograma de cirugías en función de las listas de espera que reciben con una frecuencia estipulada de los responsables de las distintas especialidades.

En las últimas décadas, a nivel internacional, se han desarrollado numerosas metodologías basadas en modelamiento matemático sobre las cuales se han creado herramientas computacionales de asistencia a la toma de decisiones para dar apoyo a los operadores de sistemas complejos en su labor cotidiana. Estas herramientas tuvieron una gran aplicabilidad inicialmente en sistemas industriales, pero rápidamente se extendieron a todo tipo de sistemas, incluyendo por supuesto los relacionados con prestaciones de servicios sanitarios. En particular, existe una vasta bibliografía relacionada con la planificación óptima de los servicios de cirugía. Unas pocas referencias para el lector interesado son: [1]-[4].

Desde hace varios años nuestro grupo de investigación viene colaborando con distintas áreas del Hospital Municipal de Agudos “Dr. Leónidas Lucero” (HMALL) de la ciudad de Bahía Blanca. El HMALL¹ es una institución emblemática de la ciudad que viene prestando servicios a la población del distrito desde su inauguración en el año 1889 contando, en la actualidad, con distintas especialidades clínicas, clínico-quirúrgicas, pediátricas, de diagnóstico y tratamiento.

Los responsables del HMALL se mostraron interesados en investigar las posibilidades de desarrollar herramientas de asistencia a la toma de decisiones, adaptadas específicamente a las características del servicio de quirófanos de la institución, con el objeto de ayudar a estudiar la infraestructura disponible y asistir en la planificación de sus actividades. La motivación principal de esta iniciativa es sumar herramientas

¹ <http://www.hmabb.gov.ar/index.php>

sistemáticas de soporte y análisis al proceso de informatización que la institución viene desarrollando hace varios años en todos sus sectores.

Para avanzar sobre esta idea, en el año 2017 un grupo conformado por investigadores del gEISS² y personal del HMALL, presentó un proyecto de Desarrollo Tecnológico Municipal³ (DETEM) cuyo beneficiario fue el Municipio de la ciudad de Bahía Blanca. Desde el punto de vista organizativo, el proyecto se estructuró en tres etapas con varias actividades cada una. La primera etapa involucró básicamente el estudio detallado de la estructura, características y funcionamiento general del servicio. La segunda, actualmente en un estado avanzado de desarrollo, consistió en el diseño y programación de un modelo de planificación con fines tácticos de las cirugías programadas y de la correspondiente interfaz de usuario. La tercera etapa, a iniciarse próximamente, involucra el desarrollo de un sistema de planificación operativa del servicio, incluyendo un modelo matemático y la correspondiente interfaz de usuario. El fin de este trabajo es el de comentar los avances realizados en el proyecto haciendo énfasis en las características del modelo de planeamiento táctico e interfaz correspondiente, que se han integrado en una herramienta denominada *iQuirófanos*. Específicamente, se describe la metodología de modelado propuesta utilizando herramientas de programación matemática del estado del arte y se ilustra su uso con un caso de estudio hipotético.

2 Servicio de Quirófanos del HMALL

Desde el punto de vista de la infraestructura edilicia, el HMALL dispone de cinco quirófanos. En el quirófano 1 solo se pueden llevar a cabo cirugías que requieren anestesia local mientras que en los quirófanos 2, 3, 4 y 5 se pueden realizar procedimientos quirúrgicos con todo tipo de anestesia. Adicionalmente, el servicio dispone de dos vestuarios, una secretaría, una oficina de jefatura y una “sala de estar” para el personal del sector momentáneamente sin actividades, incluyendo el de limpieza hasta el momento de limpiar los quirófanos. Una vez atravesada la división entre zona limpia y zona sucia, se encuentra la “sala de materiales”, donde se guarda el material estéril, se almacena instrumental quirúrgico y se encuentra una persona encargada de registrar los datos de las cirugías en curso. Detrás del mismo se encuentra la “sala de pre y post anestesia” de los pacientes, acondicionada para cuatro camillas en simultáneo, lugar de paso entre el pre y post quirúrgico. Los pacientes a ser operados ingresan por un sector de “transferencia de pacientes”.

Las cirugías programadas se organizan entre las 08:00 y las 13:00 h de lunes a sábados, mientras que las urgentes se realizan durante el resto del día. En el caso de existir una urgencia en el horario que se encuentran realizándose las cirugías programadas y no habiendo quirófano disponible, se espera que finalice alguna de las intervenciones en curso y se atiende la urgencia. Las cirugías programadas que no pudieron ser realizadas por motivo de la urgencia deben ser reprogramadas.

Los recursos humanos que deben estar disponibles simultáneamente al momento de llevar a cabo la cirugía son: enfermeros circulantes-instrumentistas (hay un total de 25

² <https://www.geiss.uns.edu.ar/>

³ <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/cofecyt/convocatorias/detem-2017>

para todos los quirófanos), técnicos anestesiólogos (se cuenta con un total de 8), médicos anestesiólogos (quienes tienen un convenio aparte, no son empleados del hospital) y el equipo de cirujanos. Por cirugía se requiere, como mínimo, un anestesiólogo, un técnico en anestesia, un cirujano, dos ayudantes de cirujano, un instrumentador y un circulante. En ciertos casos puede requerirse, además, un técnico de rayos. El sector adopta un sistema de cuatro turnos rotativos de seis horas: de 06:00 a 12:00, de 12:00 a 18:00, de 18:00 a 24:00 y de 24:00 a 06:00. De lunes a viernes el mayor plantel de profesionales se encuentra en el turno de 06:00 a 12:00, dado que todos los quirófanos están en funcionamiento. Esto implica que deben estar a disposición dos instrumentadores por quirófano (10 en total). Los días sábados solo funciona uno de los quirófanos y se necesitan 4 instrumentadores, 2 para las urgencias y 2 para el módulo de cirugía general. Luego, para el resto del día son necesarios como mínimo dos instrumentadores, además de los médicos y técnicos de guardia.

El servicio de quirófanos ofrece una gran cantidad de especialidades, entre las que se encuentran: cirugía general, ginecología, cabeza y cuello, traumatología, cirugía plástica, neurocirugía, urología, cirugía vascular, endoscopia, odontología, cucai, anestesiología, oftalmología, neumonología, cirugía infantil, cirugía cardiovascular, ortopedia y traumatología, otorrinolaringología.

Con el objeto de organizar el funcionamiento del sector, cada especialidad tiene asignado un conjunto de quirófanos ciertos días de la semana. Esta organización semanal, consensuada entre los jefes de cada especialidad y el jefe del servicio, permite por un lado balancear las listas de espera de las distintas especialidades y, por otro, brindar una previsibilidad al personal de cada especialidad para organizar su agenda. Operativamente, cada especialidad debe, con un día de anticipación presentar una lista con las intervenciones que se realizarán el día siguiente, la cual puede ser enviada vía mail o impresa haciéndola llegar al jefe de quirófanos. Además, la cantidad de cirugías programadas cada día depende del tiempo estimado que se espera dure cada una. En el caso atípico en el que un servicio deba proceder a realizar una cirugía programada pero fuera del día asignado a esa especialidad, el jefe de la especialidad que necesita el quirófano, debe solicitar con la mayor anticipación posible al jefe de quirófanos el espacio para la intervención, quién deberá reorganizar el sistema con el resto de los médicos que demandan cirugías.

Para la correcta planificación del servicio es necesario además tener en cuenta una serie de restricciones adicionales. En particular, el servicio cuenta con dos cajas de instrumental complejo, las cuales son imprescindibles en intervenciones complejas realizadas en las especialidades de ginecología y cirugía general. Los instrumentos incluidos en las cajas deben ser esterilizados luego de cada cirugía, proceso que insume 2 horas aproximadamente. Por esta razón, este recurso se debe utilizar estratégicamente para evitar un incremento en el tiempo de espera entre procedimientos. Las cirugías se deben programar en un orden tal que no se asignen operaciones consecutivas que requieran el uso de las cajas de instrumental complejo o, en su defecto, se debe considerar el tiempo de demora del inicio de la siguiente cirugía necesario para la esterilización del material. Una restricción similar la impone la disponibilidad de dos arcos de rayos, dispositivo también requerido en las especialidades de cirugía general, urología, traumatología,

cabeza y cuello y neurocirugía. Por otro lado, la desinfección de los quirófanos requiere un tiempo promedio de 30 minutos luego de cada intervención.

Además de todas estas cuestiones, existen una gran cantidad de detalles operativos adicionales relacionados, por ejemplo, con la preparación del paciente, la asignación cirujano-paciente, la realización de más de un procedimiento en una misma cirugía, la disponibilidad de camas de UTI (unidad de tratamiento intensivo), unidades de sangre y material estéril, entre otras.

Para contar con información cuantitativa del funcionamiento del servicio, se analizó la base de datos de las cirugías realizadas durante un período de 6 años (2013 a 2018). Específicamente, se relevó la siguiente información:

- i. Cantidad de cirugías realizadas en cada quirófano de cada especialidad
- ii. Uso por año de cada quirófano por especialidad con el objetivo de identificar la evolución de la demanda de cirugías
- iii. Uso por mes de cada quirófano por especialidad con el objetivo de identificar aspectos estacionales
- iv. Tiempos promedio de las cirugías por especialidad incluyendo máximos, mínimos y desvíos estándar
- v. Caracterización de las cirugías por edad y sexo del paciente por especialidad
- vi. Análisis de las cirugías programadas y de urgencia (por años, meses, sexo y edad)

Con toda la información disponible se desarrolló un modelo matemático para asignar los pacientes de una lista de espera de cada especialidad a los distintos quirófanos disponibles durante las próximas semanas. Cabe aclarar que la herramienta en su estado actual tiene un alcance táctico, básicamente orientado al análisis de la infraestructura del servicio, la detección de posibles cuellos de botella y al desarrollo de estudios de tipo ¿qué pasa si?. Con estos fines, solo se consideraron las principales restricciones mencionadas, y no se incluyeron otras de naturaleza más operativa. En las secciones subsiguientes se describe el modelo propuesto y la interfaz gráfica diseñada para su utilización. Como plataforma de programación matemática se utilizó el solver SCIP⁴ empleando el lenguaje ZIMPL⁵ para la codificación de las ecuaciones. SCIP es, en la actualidad, uno de los algoritmos de optimización no-comerciales más competitivos para problemas mixto-enteros lineales con restricciones. Adicionalmente se propuso una interfaz gráfica en la plataforma Excel para facilitar el ingreso de datos, la ejecución del modelo y la visualización de los resultados. Por el momento se adoptó la planilla de cálculo debido a la popularidad de la herramienta y a la practicidad que brinda para este tipo de tareas.

3 Modelo de optimización

El modelo desarrollado captura las principales variables, restricciones y objetivos asociados al funcionamiento del servicio. En el Apéndice de este trabajo se detalla su formulación matemática. A continuación, se describen sus principales características.

⁴ <https://www.scipopt.org/>

⁵ <https://zimpl.zib.de/>

En el sistema bajo estudio se tiene un conjunto P de pacientes en las listas de espera para realizar las cirugías correspondientes a las C especialidades médicas en un conjunto Q de quirófanos durante los D días de las S semanas que componen el horizonte de planeamiento. La formulación general se basa en una variable binaria $y_{p,c,q,d,s}$, la cual toma el valor 1 si el paciente p , que requiere una cirugía de la especialidad c se asigna al quirófano q el día d de la semana s , y 0 en caso contrario. Como se mencionó previamente, en el sector se cuenta con 5 quirófanos ($|Q| = 5$) para un total de 10 especialidades ($|C| = 10$) y se consideran 6 días de trabajo por semana ($|D| = 6$), dado que también se realizan cirugías los días sábados en uno de los quirófanos. Se asume que el horizonte de planificación puede ser de 1, 2, 3 o 4 semanas, por lo cual el conjunto S posee un máximo de 4 elementos ($|S| = 4$). El número de pacientes es un parámetro que se emplea para modificar la demanda de cirugías en cada especialidad.

Por otra parte, cada especialidad c tiene asignada ciertos quirófanos q determinados días d de la semana s . Mediante restricciones que involucran a la variable $y_{p,c,q,d,s}$ es posible asignar (o no) un paciente a un quirófano habilitado para la especialidad durante el horizonte. Adicionalmente, las cirugías programadas se realizan todos los días entre las 08:00 y las 13:00 h contemplando la posibilidad de exceder este rango horario únicamente para completar las operaciones ya iniciadas. En caso de extenderse el horario luego de las 13:00 h se incurre en costos asociados al pago de horas extra al personal.

Asimismo, se incorporaron las restricciones asociadas al empleo de las cajas de instrumental complejo y los arcos de rayos. En particular, en el caso de los arcos, si bien estos dispositivos pueden trasladarse entre los quirófanos donde se los requiera, en esta versión del modelo se adoptó un esquema simplificado que asigna cada uno de los arcos disponibles a algún quirófano/especialidad cada día de la semana, lo que conduce a que los pacientes que los requieran en sus cirugías sean asignados a esos quirófanos. Por su parte, dado que las cajas de instrumental requieren un tiempo mínimo de 2 h para su esterilización, se forzó a que solo puedan utilizarse en una única intervención en algún quirófano/especialidad cada día de la semana. Si bien estas simplificaciones pueden quitar cierta flexibilidad a las posibles soluciones, contribuyen, en principio, a asegurar su disponibilidad para la siguiente cirugía que las requiera, generando soluciones más robustas a posibles extensiones en la duración de los procedimientos.

Finalmente, la función objetivo seleccionada consiste en maximizar la cantidad de cirugías a realizar en el horizonte de planificación adoptado (1, 2, 3 o 4 semanas), ponderadas por un factor cuyo cálculo de detalla a continuación. Cada paciente posee una prioridad en función de la perentoriedad con que se debe efectuar su cirugía. Por ello se pondera cada paciente/cirugía con un peso que puede asumir los valores 1, 2 o 3, en función de su baja, media o alta prioridad, respectivamente. Adicionalmente, a medida que un paciente permanece en la lista durante más tiempo en espera de una cirugía, es deseable que su prioridad vaya en aumento, para considerar, por ejemplo, que un paciente de prioridad 2 que hace 15 días que está esperando sea asignado antes que uno de prioridad 2 que recién se incorpora a la lista. Para ello, el peso de cada cirugía posee un factor adicional que corrige la prioridad original asignada con valor mayor que 1.0, el cual se va incrementando linealmente a medida que el paciente permanece en espera de su cirugía. Finalmente, es deseable que las cirugías de mayor prioridad se realicen primero en la línea de tiempo, esto es, en los primeros días de las primeras semanas del

horizonte de planeamiento. Para lograrlo, el factor de ponderación de la prioridad de la cirugía se multiplica por otro factor que se reduce linealmente a medida que nos alejamos del primer día de la primera semana.

4 Interfaz de Usuario

Para operar el modelo descrito en la sección anterior se diseñó una interfaz de usuario cuyo panel de control se muestra en la Fig. 1. Este panel posee tres sectores bien diferenciados: ingreso de datos, ejecución del modelo y visualización de resultados. A continuación, se describe brevemente cada uno.

4.1 Ingreso de datos

El segmento “Pacientes en Listas de Espera por Especialidad” permite levantar una lista de espera cargada en el sistema (Lista Real) o generar listas con pacientes “ficticios”. Esta segunda opción (ver Fig. 2) permite rápidamente producir cantidades arbitrarias de cirugías con características generadas aleatoriamente según los parámetros que se indiquen en la “Tabla Táctica”.



Fig. 1. Panel de control

Servicios	Promedio	Desviación	Pacientes	Descripción	Limpieza	% de pacientes que requieren Arco en C	% pacientes que requieren Caja de ortopedia	% de pacientes que requieren Anestesia Total	
e1	45	22	30	Cirugía General	45	50	50	10	
e2	46	16	17	Traumatología	30	50	0	5	
e3	42	14	15	Ginecología	35	0	50	0	
e4	43	25	11	Pediatría	34	0	0	10	
e5	44	30	16	Urología	30	50	0	0	
e6	41	12	18	Cirugía Plástica	38	0	0	20	
e7	48	18	15	ORL	40	0	0	15	
e8	49	13	14	Neurocirugía	45	50	0	5	
e9	50	11	8	Cabeza y Cuello	40	50	0	10	
e10	47	10	10	Otros	38	0	0	0	
			154						

Generar Nueva Lista de Espera de Pacientes

Fig. 2. Tabla táctica.

En el ejemplo de aplicación que se observa en la Fig. 2, se genera una lista hipotética con un total de 154 pacientes. En este caso se asignó arbitrariamente 30 pacientes a la especialidad “cirugía general”, cuyas duraciones se generan aleatoriamente a partir de un promedio de 45 min y una desviación estándar de 22 min. Para esta especialidad, se adoptó un tiempo de limpieza entre cirugías de 45 min. Además, a cada paciente se le asigna aleatoriamente una prioridad y una fecha de ingreso al sistema que se emplea para computar la corrección por tiempo transcurrido en lista de espera. Finalmente, se impone que un 50% del total de las cirugías requerirá de caja de instrumental complejo, un 50% de arcos de rayos y un 10% anestesia total (valores estimados que pretenden reflejar la operatoria habitual de la especialidad). En la Fig. 3 se puede ver el resultado para este escenario que se despliega con el botón “Cirugía General” del panel de control.

	HC	NOMBRE	TIEMPO	PRIORIDAD	FECHA DE INGRESO (dd/mm/aaaa)	ARCO EN C (si/no)	CAJA DE INSTRUMENTAL (si/no)	ANESTESIA TOTAL (si/no)
1	P1	P1	52	2	8/5/2021	si	si	no
2	P2	P2	50	1	31/5/2021	no	no	no
3	P3	P3	45	1	14/5/2021	no	si	no
4	P4	P4	54	2	17/5/2021	si	no	no
5	P5	P5	50	3	28/5/2021	si	si	si
6	P6	P6	46	1	20/5/2121	no	si	no
7	P7	P7	52	1	20/5/2121	si	no	no
8	P8	P8	56	3	5/6/2021	no	si	si
9	P9	P9	67	1	2/6/2021	no	no	no
10	P10	P10	67	1	11/5/2021	si	si	no
11	P11	P11	61	3	14/5/2021	no	no	no
12	P12	P12	56	2	27/5/2021	no	si	no
13	P13	P13	61	1	13/5/2021	no	si	no
14	P14	P14	49	1	11/5/2021	no	no	no
15	P15	P15	54	3	14/5/2021	si	no	no
16	P16	P16	60	3	12/5/2021	no	no	no
17	P17	P17	52	2	13/5/2021	si	no	no
18	P18	P18	60	3	26/5/2021	si	si	no
19	P19	P19	54	3	29/5/2021	no	no	no
20	P20	P20	55	3	19/5/2021	si	no	no
21	P21	P21	66	3	4/6/2021	no	si	no
22	P22	P22	61	3	11/5/2021	no	no	no
23	P23	P23	60	3	18/5/2021	no	no	no
24	P24	P24	58	1	31/5/2021	si	no	no
25	P25	P25	65	2	20/5/2121	si	no	no
26	P26	P26	64	1	22/5/2021	si	si	no
27	P27	P27	52	3	4/6/2021	no	no	no
28	P28	P28	61	2	21/5/2021	no	si	no
29	P29	P29	57	3	18/5/2021	no	no	no
30	P30	P30	59	3	28/5/2021	no	no	no

Fig. 3. Tabla táctica.

La Fig. 4 muestra la interfaz para definir organización semanal de quirófanos, con un arreglo posible de especialidades-quirófano-día. Allí se puede modificar la asignación de especialidades a quirófanos en el caso que se desee estudiar, por ejemplo, el impacto que puede tener sobre la cola de espera de una dada especialidad, la asignación o cancelación de un dado quirófano un cierto día de la semana.

Finalmente, existe un panel para definir el horizonte de planificación en 1, 2, 3 o 4 semanas y una sección adicional de configuración de parámetros (ver Fig. 1). En esta última es posible definir otros parámetros como: horas de uso de los quirófanos, costo de horas extra y número de unidades de equipamiento específico disponibles (cajas de instrumental complejo y arcos de rayos).



QUIRÓFANO	LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES	SÁBADO
1	Otorinolaringología	Cirugía Plástica	Urología	Cirugía Plástica	Cirugía General	
2	ORL	Cabeza y Cuello	ORL	Cirugía General	Pediatría	Cirugía General
3	Urología	Cirugía General	Ginecología	Cirugía General	Urología	
4	Ginecología	Cirugía General	Traumatología	Cirugía General	Traumatología	
5	Traumatología	Neurocirugía	Traumatología	Neurocirugía	Traumatología	

Fig. 4. Organización semanal de quirófanos.

4.2 Ejecución del modelo

En el sector derecho de la Fig. 1 se despliegan tres botones: i) Configuración; donde se seleccionan las direcciones necesarias para vincular la interfaz con el algoritmo de optimización y la escritura de resultados, ii) Correr modelo; con el cual se ejecuta el algoritmo SCIP con el conjunto de datos cargado, iii) Levantar resultados; una vez completa la optimización se habilita esta opción para levantar los resultados y posibilitar la generación de los gráficos y tablas correspondientes.

La parte inferior de este sector posee una serie de indicaciones que permiten comprobar si el modelo se ha ejecutado exitosamente y si los datos se han levantado exitosamente. En ambos casos se reportan los horarios en los que se han completado dichas operaciones para referencia del usuario.

4.3 Visualización de resultados

En la parte inferior del panel de control se encuentran una serie de botones que permiten visualizar gráficamente el programa o *schedule* de cirugías obtenido. En la Fig. 5 se muestra el diagrama correspondiente cuando se selecciona la semana 1 como horizonte de planeamiento para el caso de estudio hipotético presentado en las secciones anteriores. Aquí, el color de cada bloque representa una dada especialidad (en la Fig. 4 se puede ver la especialidad correspondiente a cada quirófano-día) y su altura el tiempo que dura la cirugía. A su vez, dentro de cada bloque se proporciona el nombre del paciente, su prioridad y, si requiere de arco, caja y anestesia total en el procedimiento. De una inspección rápida del gráfico se puede observar que existe un predominio de pacientes de prioridad 3, en particular los días lunes y martes. A partir del día miércoles ya se intercalan pacientes de prioridad 2 y 1 para maximizar el uso de las instalaciones. Cabe recordar que estas prioridades están corregidas en el modelo por la espera que poseen los pacientes en el sistema. Respecto de los arcos, cada uno se asigna a un cierto quirófano cada día. Para el caso de la Fig. 5 el día jueves, por ejemplo, se asigna uno al quirófano 2 y el otro al quirófano 5, siendo utilizados por todos los procedimientos en ambos casos. Por su parte, cada una de las cajas de instrumental complejo se emplean una sola vez por día en un solo quirófano, debido que luego deben sometidas a un

prolongado proceso de esterilización. Para el caso de la Fig. 5 el día jueves, por ejemplo, se emplea una de las cajas en el quirófano 3 (paciente p1) y la otra en el quirófano 4 (paciente p21).

Además de la información en forma gráfica, la solución óptima se proporciona en forma de tablas para el periodo de planificación seleccionado indicando las cirugías por especialidad y las cirugías por quirófano. Los valores correspondientes al caso hipotético analizado se presentan en la Tabla 1 (columna Caso Base).

5 Análisis de escenarios

Como puede observarse en la Tabla 1, para el escenario propuesto (Caso Base), en la semana 1 se realizaron un total de 78 cirugías quedando en cola de espera, 76 de las 154 originales. Para ilustrar el uso de la herramienta desarrollada se propone analizar el impacto sobre las colas de espera de dos pequeños cambios en el sistema. En primer lugar, en el Caso 1 se propone extender en media hora el horario de funcionamiento habitual de los quirófanos pasando de 5.0 h a 5.5 h. Como se evidencia en la Tabla 1, esta modificación permitiría incrementar en 5 (78 a 83) el total de cirugías realizadas en la semana. En el Caso 2 se analiza la posibilidad de asignar un quirófano-día adicional a la especialidad ORL, que en el caso base posee una cola de espera de 12 cirugías. Para este estudio se asignó el turno del quirófano 2 del sábado, que correspondía originalmente a Cirugía General. Claramente esta modificación contribuyó a reducir la CE de ORL en 3 pacientes, pero por supuesto a costa de la incrementarse la de Cirugía General en igual proporción. Cabe aclarar que tanto la extensión en el horario de funcionamiento del servicio como la reasignación de quirófanos-día, traen aparejados costos relacionados con el pago de horas extra y requieren de la modificación de la rutina de trabajo de muchas personas por lo cual no son modificaciones sencillas de implementar en la práctica. Sin embargo, un ejercicio como este permite exponer cuantitativamente las mejoras posibles esperables de modificaciones de estas características.

Tabla 1. Total de cirugías por especialidad en la semana 1.

Especialidad	Caso base		Caso 1		Caso 2	
	R	CE	R	CE	R	CE
Cirugía General	21	9	21	9	18	12
Traumatología	14	3	14	3	14	3
Ginecología	6	9	6	9	6	9
Pediatría	3	8	4	7	3	8
Urología	10	6	12	4	10	6
Cirugía Plástica	6	9	6	9	6	9
ORL	6	12	8	10	9	9
Neurocirugía	6	8	6	8	6	8
Cabeza y Cuello	3	5	3	5	3	5
Otros	3	7	3	7	3	7
Total	78	76	83	71	78	76

R: Cirugías realizadas; CE: Cola de Espera

	LUNES	MARTES	MÉRCOLES	JUEVES	VIERNES	SÁBADO
Q1	P149 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P151 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P150 Pr: 2 (A.ai Cno AnTocno)	P150 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P151 Pr: 2 (A.ai Cno AnTocno)	
	P150 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P151 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P151 Pr: 3 (A.ai Cno AnTocno)	P150 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P151 Pr: 3 (A.ai Cno AnTocno)	
	P151 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P150 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P150 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P151 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P151 Pr: 3 (A.ai Cno AnTocno)	
Q2	P152 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P157 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P150 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P151 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P151 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P151 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)
	P153 Pr: 2 (A.no Cno AnTocno)	P158 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P159 Pr: 2 (A.no Cno AnTocno)	P157 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P158 Pr: 2 (A.no Cno AnTocno)	P158 Pr: 3 (A.ai Cno AnTocno)
	P154 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P156 Pr: 3 (A.ai Cno AnTocno)	P150 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P158 Pr: 2 (A.no Cno AnTocno)	P158 Pr: 2 (A.no Cno AnTocno)	P154 Pr: 3 (A.ai Cno AnTocno)
Q3	P155 Pr: 3 (A.ai Cno AnTocno)	P151 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P153 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P151 Pr: 2 (A.ai Cno AnTocno)	P154 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	
	P152 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P156 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P154 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P155 Pr: 3 (A.ai Cno AnTocno)	P155 Pr: 2 (A.no Cno AnTocno)	
	P154 Pr: 3 (A.ai Cno AnTocno)	P159 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P150 Pr: 2 (A.no Cno AnTocno)	P150 Pr: 3 (A.ai Cno AnTocno)	P155 Pr: 2 (A.no Cno AnTocno)	
	P150 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)					
Q4	P151 Pr: 3 (A.ai Cno AnTocno)	P158 Pr: 3 (A.ai Cno AnTocno)	P151 Pr: 3 (A.ai Cno AnTocno)	P159 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P158 Pr: 2 (A.ai Cno AnTocno)	
	P152 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P152 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P155 Pr: 2 (A.ai Cno AnTocno)	P151 Pr: 3 (A.ai Cno AnTocno)	P152 Pr: 2 (A.ai Cno AnTocno)	
	P153 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P153 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P157 Pr: 3 (A.ai Cno AnTocno)	P150 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P156 Pr: 3 (A.ai Cno AnTocno)	
Q5	P158 Pr: 3 (A.ai Cno AnTocno)	P156 Pr: 2 (A.no Cno AnTocno)	P158 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P155 Pr: 2 (A.ai Cno AnTocno)	P158 Pr: 2 (A.no Cno AnTocno)	
	P153 Pr: 3 (A.ai Cno AnTocno)	P152 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P150 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P159 Pr: 2 (A.ai Cno AnTocno)	P159 Pr: 2 (A.no Cno AnTocno)	
	P154 Pr: 3 (A.ai Cno AnTocno)	P153 Pr: 3 (A.ai Cno AnTocno)	P151 Pr: 3 (A.no Cno AnTocno)	P156 Pr: 2 (A.ai Cno AnTocno)		

Fig. 5. Programa de cirugías.

6 Conclusiones

El diseño de un sistema para ayudar en la planificación de un servicio hospitalario tan importante y complejo como lo es el de quirófanos, es una actividad muy desafiante. En este trabajo se describen las características de un modelo sencillo, desarrollado inicialmente para estudiar la infraestructura del servicio del HMALL, mediante la

generación aleatoria de listas de espera de cada especialidad. En su versión actual, la herramienta permite hacer estudios de tipo ¿qué pasa sí?, de manera de analizar el costo/beneficio de introducir modificaciones operativas y estructurales, y en general, relajar cuellos de botella. Si bien los casos presentados ilustran solo dos posibilidades muy intuitivas, se admiten muchos otros estudios adicionales, por ejemplo, ¿cómo se beneficiaría el sistema si se lograra reducir los tiempos de limpieza promedio de los quirófanos, por ejemplo, mediante la incorporación de más personal?, ¿cómo impactaría en el sistema la disponibilidad de un mayor número de cajas de instrumental complejo y arcos de rayos? Por supuesto todas las incorporaciones de recursos para relajar cuellos de botella poseen costos asociados que deben justificarse entre muchos otros recursos que anualmente se requieren, tanto dentro del propio servicio, como parte de otros servicios del hospital.

Finalmente, la herramienta desarrollada puede emplearse también para realizar el planeamiento operativo del servicio si se contara con la lista de espera completa de cada especialidad. Como se mencionó anteriormente, en la actualidad la lista de pacientes se maneja de forma descentralizada y cada servicio define día a día qué pacientes operar en los quirófanos que tiene asignados semanalmente. La disponibilidad de una herramienta como la descrita permitiría cuantificar las potenciales ventajas de implementar una planificación centralizada de mediano plazo. Cabe aclarar que un modelo de planeamiento operativo debería en principio incluir un mayor nivel de detalle que el descrito, por ejemplo, la posibilidad de vincular a cada paciente con su cirujano en el arreglo especialidad-quirófano-día vigente. Adicionalmente, una herramienta de alcance operativo debería incluir también un esquema de “*re-scheduling*” en el caso de interrupciones de los programas previstos, por ejemplo, por la ocurrencia de incertidumbres, típicamente la extensión de una cirugía por sobre el tiempo previsto, lo que provoca que las restantes del día no se pudieran efectuar.

Referencias

1. Cardoen B., Demeulemeester E., Beliën J. (2010); Operating room planning and scheduling: A literature review; *European Journal of Operational Research*, 201 (3) 921-932.
2. Molina Pariente J. M, Fernandez Viegas V., Framinian J.M. (2015); Integrated operating room planning and scheduling problem with assistant surgeon dependent surgery durations; *Computers & Industrial Engineering*, 82, 8-20.
3. Guido R., Conforti D. (2017); A hybrid genetic approach for solving an integrated multi-objective operating room planning and scheduling problem; *Computers & Operations Research*, 87, 270-282.
4. Durand G. A., Bandoni J. A. (2020); Simulation-based optimization for the scheduling of elective surgery under uncertainty and downstream capacity constraints; *Latin American Applied Research* 50(2): 127-132.

Apéndice

En esta sección se presenta la formulación matemática del problema de asignación de pacientes en cola de espera al servicio de quirófanos del HMALL.

$$\max FO = \sum_{p,c,q,d,s} (|S| + 1 - s) \cdot \left(\frac{|D| + 1 - d}{s} \right) \cdot PRcor_p \cdot y_{pcqds} \quad (1)$$

sujeta a:

$$\sum_{c,q,d,s} y_{pcqds} \leq 1 \quad \forall p \quad (2)$$

$$y_{pcqds} \leq TS_{qcd} \quad \forall p, c, q, d, s \quad (3)$$

$$\sum_{p,c} (TC_{pc} + TL_c) \cdot y_{pcqds} \leq WH + 15 + HE_{qds} \quad \forall q, d, s \quad (4)$$

$$HE_{qds} \leq MHE \quad \forall q, d, s \quad (5)$$

$$HE_{qds} \leq HE_{qds}^{max} \cdot z_{qds} \quad \forall q, d, s \quad (6)$$

$$\sum_q z_{qds} \leq z^{max} \quad \forall d, s \quad (7)$$

$$15 \cdot a1_{qds} + 75 \cdot a2_{qds} + 135 \cdot a3_{qds} \leq HE_{qds} - \sum_c (TC_c \cdot TS_{qcd}) \cdot z_{qds} \quad \forall q, d, s \quad (8)$$

$$HE_{qds} - \sum_c (TC_c \cdot TS_{qcd}) \cdot z_{qds} \leq 75 \cdot a1_{qds} + 135 \cdot a2_{qds} + 195 \cdot a3_{qds} \quad \forall q, d, s \quad (9)$$

$$a1_{qds} + a2_{qds} + a3_{qds} \leq 1 \quad \forall q, d, s \quad (10)$$

$$HEint_{qds} = a1_{qds} + 2 \cdot a2_{qds} + 3 \cdot a3_{qds} \quad \forall q, d, s \quad (11)$$

$$\sum_{q,d} HEint_{qds} \leq \frac{HES}{60} \quad \forall s \quad (12)$$

$$y_{pcqds} \cdot arc_p \leq w1_{qds} \quad \forall p, c, q, d, s \quad (13)$$

$$\sum_q w1_{qds} \leq Narc \quad \forall d, s \quad (14)$$

$$\sum_{p,c} y_{pcqds} \cdot box_p \leq w2_{qds} \quad \forall q, d, s \quad (15)$$

$$\sum_q w2_{qds} \leq Nbox \quad \forall d, s \quad (16)$$

$$CHE1 = c1 \cdot \sum_{q,d,s} (a1_{qds} + a2_{qds} + a3_{qds}) \quad (17)$$

$$CHE2 = c2 \cdot \sum_{q,d,s} (a2_{qds} + 2 \cdot a3_{qds}) \quad (18)$$

$$CostHE = CHE1 + CHE2 \quad (19)$$

$$PRcor_p = PR_p + \frac{DD_p}{ND} \quad \forall p \quad (20)$$

En la Ec. (1) se presenta la función objetivo FO que maximiza la asignación de pacientes a los quirófanos, poniendo énfasis en resolver más rápidamente aquellos procedimientos de mayor prioridad. Cada procedimiento se encuentra ponderado por un factor conformado por (i) la prioridad corregida por tiempo de espera y (ii) la cercanía en el tiempo de la cirugía. De esta manera, los procedimientos de alta prioridad se realizan en los primeros días de las primeras semanas del horizonte de planeamiento.

Las Ecs. (2) y (3) controlan que cada paciente p de la especialidad c sea asignado una única vez a un único quirófano q un solo día d de las semanas que forman el horizonte de planificación y, que dicha asignación se corresponda con lo establecido por la grilla de uso de quirófanos según la especialidad (TS_{qcd}).

Las Ecs. (4) a (7) controlan y restringen el uso de las horas extras (HE_{qds}) a lo largo de la planificación. Por su parte, las Ec. (8) a (12) controlan las horas extras específicamente asociadas al servicio de anestesiología. Las Ec. (8) a (10) determinan el tramo de tiempo en el cual se extendió el uso del servicio de anestesiología que posee un régimen diferente al del resto de las especialidades.

Las Ecs. (13) a (16) controlan que el uso diario de cajas de instrumental complejo y arcos de rayos no sobrepase la cantidad máxima disponible de cada uno de ellos. La restricción (13) determina en qué quirófanos se requerirá un arco en C en cada período del horizonte mediante la variable binaria $w1_{qds}$ y la Ec. (14) asegura que el total de equipos utilizados diariamente en todo el sistema no sobrepase la cantidad máxima disponible, $Narc$. De manera similar, las Ecs. (15) y (16) establecen qué quirófanos emplearán cajas de instrumental complejo controlando que el total diario empleado no supere el número disponible, $Nbox$, utilizando la variable binaria $w2_{qds}$. Considerando que la esterilización de estos dispositivos demora alrededor de 2 horas, se estableció que es posible emplear una única caja por quirófano por día.

Las Ecs. (17), (18) y (19) computan los costos asociados al uso de horas extra. Finalmente, la ecuación (20) calcula el valor ajustado de la prioridad $PRcor_p$ en función de la cantidad de días de espera transcurridos de forma que, a igual prioridad el paciente con mayor tiempo de permanencia en la lista de espera sea atendido antes que aquel que haya ingresado posteriormente a la misma. La formulación además permite que un paciente ascienda al nivel de prioridad siguiente una vez transcurrido el plazo máximo establecido en el parámetro ND .