

PLANEAMIENTO DE CORTO PLAZO DE SERVICIOS DE CIRUGÍA DE SERVICIOS DE CIRUGÍA EN HOSPITALES DE ALTA COMPLEJIDAD: Aplicación a un Caso Real

Guillermo Durand⁽¹⁾, Gabriel Cano⁽²⁾, Anabella Ciucci-Giggi⁽²⁾, Paola Eberling⁽²⁾,
Mirna Scenna⁽³⁾, Aníbal Blanco⁽¹⁾, Alberto Bandoni⁽¹⁾

{gdurand, abandoni}@plapiqui.edu.ar

⁽¹⁾ Planta Piloto de Ingeniería Química, PLAPIQUI (UNS-CONICET)

⁽²⁾ Departamento de Ingeniería Química, UNS

⁽³⁾ Hospital Regional de Agudos “Dr. José Penna”, Ministerio de Salud de la Prov. Bs.As.

Resumen. Este trabajo describe un modelo matemático tomado de la literatura para la planificación de corto plazo (*scheduling*) de servicios médicos quirúrgicos en hospitales de alta complejidad, y su aplicación a un caso real. Dicho problema consiste en la asignación de los recursos del servicio y en decidir en qué cómo realizar una serie de casos de cirugía a fin de minimizar el tiempo necesario para completar todos los casos (*makespan*). En el trabajo, se utilizó un modelo de programación lineal mixto-entero (MILP), el cual considera restricciones relevantes a personal médico, quirófanos, equipos y otros.

Palabras clave: Planificación de corto plazo de recursos en quirófanos, Modelos Matemáticos

1. Introducción

La planificación y programación de los recursos disponibles en un hospital interfieren directamente con la calidad de servicio brindado a la población. Más aún, existe un creciente uso de hospitales públicos para intervenciones quirúrgicas, donde no existen herramientas de gestión que permitan realizar de forma eficiente una planificación a corto o largo plazo.

El sistema de salud argentino está compuesto por tres subsistemas: el público, el de las Obras Sociales y el privado. En el presente trabajo se estudiará un caso real ocurrido en el subsistema público. Este subsector, cuyos recursos provienen del sistema impositivo, provee servicios de salud de forma gratuita a través de una red de hospitales públicos y centros de salud, a toda la población. Las intervenciones quirúrgicas es uno de los servicios prestados.

La cirugía es una actividad importante en la mayoría de los hospitales ya que se estima que genera aproximadamente el 40% de los costos de los recursos de hospitales, incluidos los gastos de personal (cirujanos, anestesistas, enfermeras, etc.) y las instalaciones (quirófanos, camas de cuidados intensivos, etc.) (Maccario *et al*, 1995). En este contexto, la dirección del hospital está sujeta a la presión de ajuste para el control de los costos quirúrgicos al tiempo de garantizar la calidad de la atención de los pacientes en el momento oportuno.

El presente estudio se divide en seis partes, donde se describe el problema a tratar, el modelo matemático (seleccionado de la literatura) para encararlo, sus aplicación a un caso real, resultados y conclusiones.

1.1 Revisión Bibliográfica

En la presente sección se presentan distintos trabajos ya realizados por otros autores sobre el uso óptimo de recursos en quirófanos de hospitales.

La tesis de Wolff Rojas (2011) trabaja con el fin de obtener una optimización en el uso del recurso Quirófano, reduciendo los tiempos de espera de los pacientes y haciendo un uso eficiente de los recursos humanos necesarios. Conjuntamente tiene en cuenta las reglas de priorización utilizadas para cada paciente; es decir elige los casos según la urgencia de los mismos. Los tiempos utilizados para las intervenciones son promedios estimados, sin tener en cuenta el tipo de operación que se llevara a cabo; es decir son constantes para todos los casos a tratar.

Otro trabajo, de Antomil Ibias *et al* (2004), tiene un mismo objetivo de optimizar la planificación de recursos en quirófanos, pero teniendo además como variable de decisión las listas de espera y los servicios a los que corresponde cada intervención quirúrgica. Este trabajo considera asimismo, el uso de horas extras para las salas de operación.

Otros proyectos realizados con el fin de optimizar los recursos de quirófanos son los trabajos de Jansson *et al* (2000) y Reveco y Weber (2011) pero en ningún caso se desarrollan como herramienta de gestión para dicho servicio. Es decir, se tienen en cuenta otros factores, tales como listas de espera presentadas por los demás servicios del hospital, priorización de los pacientes según su estado de salud, costos operativos, etc.

En el estudio Pham y Klinkert (2008) se desarrolla un modelo matemático de optimización mixto entero-lineal (MILP) para la planificación de corto plazo (*scheduling*) específica para un conjunto de casos programados en un horizonte de tiempo dado (un día, una semana), con el objetivo de minimizar el tiempo necesario para realizar todas las tareas asociadas (*makespan*). El modelo tiene en cuenta restricciones sobre la disponibilidad de recursos y su utilización asociada. Esta técnica es la que se utiliza en el presente trabajo para su aplicación a un caso real, el servicio de cirugía del Hospital Interzonal General de Agudos Dr. José Penna, ubicado en la ciudad de Bahía Blanca (Buenos Aires).

2. Descripción del Proceso

Los quirófanos se encuentran entre los recursos más críticos que generan mayores costos para un hospital. Por estas razones, la planificación y la programación de las actividades se han convertido en las principales prioridades para los hospitales. Los pacientes son divididos en las categorías pacientes internados y pacientes ambulatorios. Por lo general, los casos ambulatorios son más cortos, menos complejos y menos variables que el caso del paciente hospitalizado.

Los pacientes ambulatorios llegan el mismo día de la cirugía y se van a las horas de realizada la intervención, mientras que los pacientes hospitalizados están internados uno o más días antes de la cirugía y después de la misma para continuar con el cuidado. El H.I.G.A. Penna es un hospital integrado, es decir deben servir a ambos tipos de pacientes en las mismas instalaciones.

Durante una cirugía, el flujo de pacientes típico pasa por tres etapas: el preoperatorio, operatorio y postoperatorio. El flujo de pacientes en los hospitales integrados puede ser descrito como se ve en la Fig. 1.

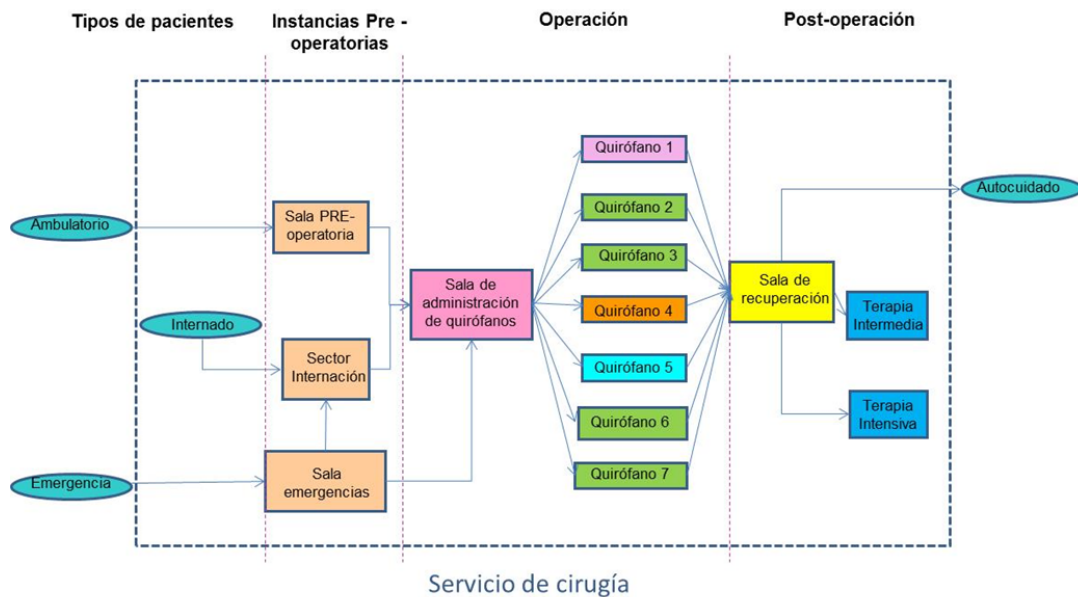


Fig. 1. Esquema del flujo de Pacientes

- Fase Preoperatoria: los pacientes ambulatorios llegan directamente a dicha sala, donde proceden a la preparación para el ingreso a quirófanos.
- Fase Operatoria: En el quirófano, el paciente es anestesiado para la cirugía por un anestesiólogo y a continuación, operado por un cirujano o varios, con la ayuda de una enfermera o varias y el técnico quirúrgico.
- Fase Postoperatoria: después de la cirugía, el paciente puede ser transportado a una sala de post operación hasta que se recupera del efecto de la anestesia; o esperar que pase dicho efecto dentro del quirófano. Luego según los cuidados que se necesiten será el destino que se elegirá. En el caso de los pacientes ambulatorios por lo general siguen con un autocuidado por lo que se van del hospital terminada la cirugía, mientras que los pacientes hospitalizados y de emergencia podrán pasar a cuidado intermedio o cuidado intensivo.

Para controlar el flujo de pacientes, se debe planificar sobre la distribución de recursos y el *scheduling* de las tareas. Para decidir sobre dicha planificación deben conocerse de antemano, los casos a realizar y los tiempos estimados para dichas cirugías.

En los casos programados los pacientes hospitalizados o ambulatorios normalmente pueden esperar para sus operaciones durante al menos tres días y son programadas de uno o

más días antes de la fecha de la cirugía. Los casos de emergencia requieren cirugía en un tiempo muy corto para evitar la pérdida de vidas humanas o graves daños a los pacientes, es por ello que se deben armar planificaciones diarias para los quirófanos pero siempre teniendo en cuenta la incertidumbre frente a estos casos de emergencia.

Los sistemas de programación de casos quirúrgicos pueden estar presentados en bloques, es decir se programan intervenciones quirúrgicas en los quirófanos en un intervalo de tiempo correspondiente para un servicio particular con sus recursos correspondientes (cirujanos, anestesta, técnicos, etc.). Un ejemplo se da en la Tabla 1, donde se muestran los bloques diarios para una semana en un hospital con 7 quirófanos, donde cada bloque es atribuido a un servicio.

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Quirófano	8-14Hs	8-14Hs	8-14Hs	8-14Hs	8-14Hs
Quirófano 1	General	Ginecología	General	Ginecología	General
Quirófano 2	Odontología	Oftalmología	Pediatría	Oftalmología	Pediatría
Quirófano 3	General	Traumatología	General	Traumatología	General
Quirófano 4	Ambulatorio	Ambulatorio	Ambulatorio	Ambulatorio	Ambulatorio
Quirófano 5	Cardiovascular	Cardiovascular	Cardiovascular	Cardiovascular	Cardiovascular
Quirófano 6		Cardiovascular			
Quirófano 7	Neurocirugía	Urología	Neurocirugía	Urología	Neurocirugía

Tabla 1. Ejemplo de trabajo en quirófanos en bloques.

La asignación de trabajo en bloques puede verse como un sistema ordenado tanto para los servicios correspondientes como para la toma de decisiones por parte del servicio de quirófanos; pero limita a programar con dichas restricciones sin importar la optimización del uso de las salas de operación.

3. Modelo Matemático

En esta sección se detallan las ecuaciones del modelo extraído de Pham y Klinkert (2008) junto con los índices, parámetros y variables que conforman a las mismas. El modelo empleado, se trata de un modelo lineal mixto entero (MILP).

El objetivo del modelo planteado es la minimización del *makespan* en el que todos los trabajos son realizados; respetando ciertas restricciones propuestas. El modelo es multi-modo; esto es, se definen modos que son un conjunto de recursos que están disponibles en forma simultánea durante una ventana de tiempo determinada.

En la Tabla 2 se muestran los índices, parámetros y variables utilizados en el modelo matemático.

Índices	
$m \in M$	Número de recurso.
$i \in I$	Número de operación.
$J \in \partial$	Número de trabajo.
O_j	Set de pares de operaciones consecutivas de un trabajo J .
R_i	Modos que son posibles utilizar en cada operación i .
R	Sets de modos $R = \cup_{i \in I} R_i$
M_i^r	Modo r para operaciones $i \in I$.
Parámetros	
p_i^r	Tiempo de ejecución de la operación en el modo M_i^r .
p_i^{su}	Tiempo de ajuste de operación $i \in I$. Tiempo muerto, preparación del quirófano.
p_i^{cl}	Tiempo de liberación del espacio de operación. Tiempo de limpieza.
b_i	Tiempo máximo de espera permitido para la operación $i \in I$ antes de que la operación se mueva a la siguiente etapa.
e^r	Hora de inicio del intervalo de disponibilidad para cada $r \in R_i$.
f^r	Finalización del tiempo de disponibilidad para cada $r \in R_i$.
H	Número grande [min].
α	Factor de peso muy pequeño.
T	Operación ficticia de duración nula, T se realiza después de todas las operaciones.
J_i	Operaciones que pertenecen a cada trabajo $i \in I$.
Variables	
z_i^r	Variable binaria cuyo valor será uno, $z_i^r = 1$, si el modo M_i^r es asignado a la operación i .
y_{ij}	Variable binaria cuyo valor será uno, $y_{ij} = 1$, si la operación j es procesada después de la operación i en recursos compartidos.
x_i	Tiempo de inicio de operación $i \in I$.
l_i	Tiempo de finalización de operación $i \in I$.
x_t	Tiempo de inicio de la operación ficticia t .

Tabla 2. Índices, parámetros y variables utilizadas en el modelo matemático.

A continuación se dan a conocer el sistema de ecuaciones que conforman el modelo utilizado. La primera de ellas es la Ec. (1) la cual representa a la función objetivo. La misma se encarga de minimizar el momento de terminar todos los trabajos x_t , y al mismo tiempo programar las operaciones tan pronto como sea posible, reduciendo al mínimo la suma de todos los tiempos de arranque. El factor α , normalmente de valores pequeños, indica la importancia relativa que se da al segundo término frente al primero.

$$\text{Minimizar } x_t + \alpha \sum_{i \in I} x_i \quad (1)$$

La Ec. (2) asegura que a cada operación se le asigna sólo un modo.

$$\sum_{r \in R_i} z_i^r = 1 \quad \forall i, i \in I \quad (2)$$

Las Ecs. (3) y (4) dicen que si al modo r se le asigna a la operación i , el tiempo que transcurre entre el inicio y la finalización está entre p_i^r (tiempo de procesamiento del modo) y b_i (tiempo máximo de espera para i).

$$l_i - x_i - p_i^r z_i^r \geq 0 \quad \forall i, \forall r, i \in I, r \in R_i \quad (3)$$

$$l_i - x_i - \sum_{r \in R_i} p_i^r z_i^r \leq b_i \quad \forall i, i \in I \quad (4)$$

La Ec. (5) asegura que para dos operaciones consecutivas i y j de un trabajo J , la segunda operación comience inmediatamente después de que termine la primera.

$$l_i - x_j = 0 \quad \forall J, \forall i, \forall j, (i, j) \in O_j, J \in \partial, i, j \in I \quad (5)$$

Las Ecs (6) y (7) aseguran que las operaciones i, j no se solapen en el tiempo si se les ha asignado modos que comparten por lo menos un recurso.

$$x_j - l_i + H(2 - z_i^r - z_j^s) + H(1 - y_{ij}) \geq p_i^{cl} + p_j^{su} \quad (6)$$

$$\forall i, \forall j, \forall r, \forall s, i, j \in I, i < j, J^i \neq J^j, r \in R_i, s \in R_j, M_i^r \cap M_j^s \neq \emptyset$$

$$x_i - l_j + H(2 - z_i^r - z_j^s) + H y_{ij} \geq p_j^{cl} + p_i^{su} \quad (7)$$

$$i, \forall j, \forall r, \forall s, i, j \in I, i < j, J^i \neq J^j, r \in R_i, s \in R_j, M_i^r \cap M_j^s \neq \emptyset$$

Ecs. (8) y (9) aseguran que la instalación, el procesamiento y la limpieza de cualquier operación se realizan dentro del intervalo del modo asignado.

$$x_i - e^r z_i^r \geq p_i^{su} \quad \forall i, \forall r, i \in I, r \in R_i \quad (8)$$

$$\sum_{r \in R_i} f^r z_i^r - l_i \geq p_i^{cl} \quad \forall i, i \in I \quad (9)$$

La Ec. (10) dice que el momento de terminar todos los trabajos es mayor que el tiempo de terminar cualquier operación, considerando también tiempo de limpieza.

$$x_t - l_i \geq p_i^{cl} \quad \forall i, i \in I \quad (10)$$

Por último, la Ec. (11) se asegura de que los tiempos sean siempre positivos y Ecs. (12) y (13) especifican las variables binarias.

$$x_i, l_i, x_t \geq 0; \quad \forall i, i \in I \quad (11)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, \forall j, i, j \in I, i < j \quad (12)$$

$$z_i^r \in \{0,1\} \quad \forall i, \forall r, i \in I, r \in R_i \quad (13)$$

4. Implementación: H.I.G.A. Dr. José Penna

El Hospital General de Agudos "Dr. José Penna", es uno de los principales hospitales públicos de la Provincia de Buenos Aires. Se encuentra ubicado en la ciudad de Bahía Blanca.

El sector de quirófanos de dicho hospital cuenta con ocho salas de operación. Una de ellas es exclusiva de cesáreas, otra de las salas es para uso exclusivo de pacientes ambulatorios (anestesia local).

Todos los quirófanos están equipados para realizar cirugías con anestesia general, debido a que tienen todos los recursos necesarios. En cuanto, a los equipamientos para las distintas cirugías, los mismos pueden trasladarse de un quirófano a otro si es necesario.

Desde hace años en el hospital se trabaja con un planeamiento de operaciones en bloque. Según los días de la semana, operan distintos servicios. Esto se debe a que hay mesas de quirófanos que están más preparadas para ciertos pacientes que otras. Las cirugías programadas entran por internación o ambulatorio y las no programadas por emergencia, generalmente. Actualmente, en el área de quirófanos existe una sala de recuperación la cual se encuentra instalada y equipada óptimamente, pero no se puede utilizar por cuestiones de personal.

Hay tres tipos de pacientes que pueden ser intervenidos quirúrgicamente, los de emergencia, ambulatorios e internados, por ello el H.I.G.A. Penna es un hospital integrado.

En la actualidad la toma de decisiones en el ámbito de quirófanos se produce a diario organizando un cronograma alternativo a medida que desde los servicios del hospital se van pidiendo los turnos correspondientes. La responsabilidad de dicha tarea es de la Jefa de Quirófanos que a diario propone un diagrama organizativo.

En el presente trabajo se aplicó el modelo descrito en la Sección 3 al caso del H.I.G.A. Penna. Los diferentes escenarios propuestos fueron resueltos con el paquete de modelado y optimización GAMS 24.0/Gurobi 5.1 (GAMS, 2012) en un sistema Intel iCore7 con 4Gb

de RAM y sistema operativo de 64 bits. El criterio para la solución óptima es de 1% de separación entre la mejor solución entera y la solución relajada (*integer gap*).

Para la creación de escenarios se extrajo de la base de datos del H.I.G.A. Penna los casos de intervención quirúrgica realizados durante el mes de febrero de 2013. Se computaron tiempos de operación, pre y post operación, así como también datos de los servicios para poder usar el trabajo en bloques.

A continuación, como modo de ejemplo, se muestra un escenario correspondiente a un día de servicio. Los tiempos que se muestran a continuación son los intervalos de tiempo donde los quirófanos trabajan, $t_1 = 0$ min (8:00hs, día 1), $t_{1t} = 360$ min (14:00hs, día 1). El tiempo utilizado en el modo virtual *dummy* es un tiempo que se le da al modelo para que, si alguna de las operaciones no puede realizarse dentro del horizonte de tiempo planificado, el modelo elija hacerlo en ese modo imaginario. El tiempo de inicio del modo *dummy* es t_{1t} , y su finalización $t_2 = 1800$ min.

Los 7 modos necesarios para codificar este escenario se muestran en la Tabla 3. En el presente caso cada modo solo contiene un solo recurso y es la sala donde se realiza, ya que los profesionales son provistos por los servicios que piden turno en quirófanos.

Modo	Recursos del Modo	Tiempo disponible
<i>Modos Preoperatorios</i>		
1	Sala Pre	t_1-t_{1t}
<i>Modos Operatorios</i>		
2	Quirófano 1	t_1-t_{1t}
3	Quirófano 2	t_1-t_{1t}
4	Quirófano 3	t_1-t_{1t}
5	Quirófano 4	t_1-t_{1t}
6	Quirófano 5	t_1-t_{1t}
7	Quirófano 6	t_1-t_{1t}
8	Quirófano 7	t_1-t_{1t}
<i>Modos Postoperatorios</i>		
9	Sala Post	t_1-t_{1t}
<i>Modo Dummy</i>		
10	Ø	$t_{1t}-t_2$

Tabla 3. Modos, recursos y tiempos disponibles.

La Tabla 4 muestra los 10 casos previstos para llevar a cabo durante un día de trabajo en los quirófanos (de 8:00 a 14:00 Hs.), contando con información sobre los números de casos,

a los servicios que pertenecen para el trabajo en bloques y las duraciones previstas para las operaciones; como así también tiempos de pre y post operación. Además según la anestesia (sea general o local) y los servicios los posibles modos asignables. La limpieza y los tiempos de preparación para las operaciones son 10 minutos y 20 minutos, respectivamente.

Caso	Preoperatorio		Operatorio		Postoperatorio	
	Tiempo [min]	Modos	Tiempo [min]	Modos	Tiempo [min]	Modos
1			213	{2,4,10}	75	{9,10}
2			170	{8,10}	60	{9,10}
3			165	{2,4,10}	55	{9,10}
4			77	{2,4,10}	34	{9,10}
5			175	{2,4,10}	58	{9,10}
6			80	{2,4,10}	50	{9,10}
7			166	{2,4,10}	52	{9,10}
8	30	{1,10}	55	{5,10}	20	{9,10}
9	30	{1,10}	39	{5,10}	10	{9,10}
10			130	{3,10}	42	{9,10}

Tabla 4. Casos, modos asignables y tiempos estimados.

Los modos que utiliza cada tarea de cada caso son seleccionados según el servicio al que corresponden y si son con anestesia general o local. Los casos tomados corresponden a un mismo día para respetar el trabajo en bloques (ver Tabla 1).

La Tabla 5 muestra la solución óptima para el escenario planteado. Para el mismo se considera una sala de Post-operación con 10 camas disponibles, por lo que el recurso del modo de Post-operación no sería un recurso limitante para la planificación diaria.

Tarea	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
Preoperatorio					
Operación	(6,64,292)	(8,20,190)	(3,127,292)	(3,20,97)	(7,20,195)
Postoperatorio	(9,292,367)	(9,190,250)	(9,292,342)	(9,97,131)	(9,195,253)
Tarea	Caso 6	Caso 7	Caso 8	Caso 9	Caso 10
Preoperatorio			(1,0,30)	(1,208,238)	
Operación	(4,20,100)	(2,20,186)	(5,30,85)	(5,238,292)	(4,147,292)
Postoperatorio	(9,100,140)	(9,186,238)	(9,85,105)	(9,292,302)	(9,292,334)

Tabla 5. Solución óptima del escenario ejemplo. Tiempos en minutos (modo, inicio, final).

Como puede observarse en la Tabla 5 el modelo logró realizar los 10 casos propuestos. Cabe aclarar que en este ejemplo no se trabajó con el diagrama en bloques; es decir se liberó la restricción que cada servicio operase en el quirófano específico ya destinado. La Fig. 2 muestra el diagrama de Gantt de la optimización lograda. Cada bloque representa una tarea (pre, operatorio y post) de cada caso, los cuales han sido codificados por color, el número dentro o cerca de cada bloque también indica el caso al que pertenecen.

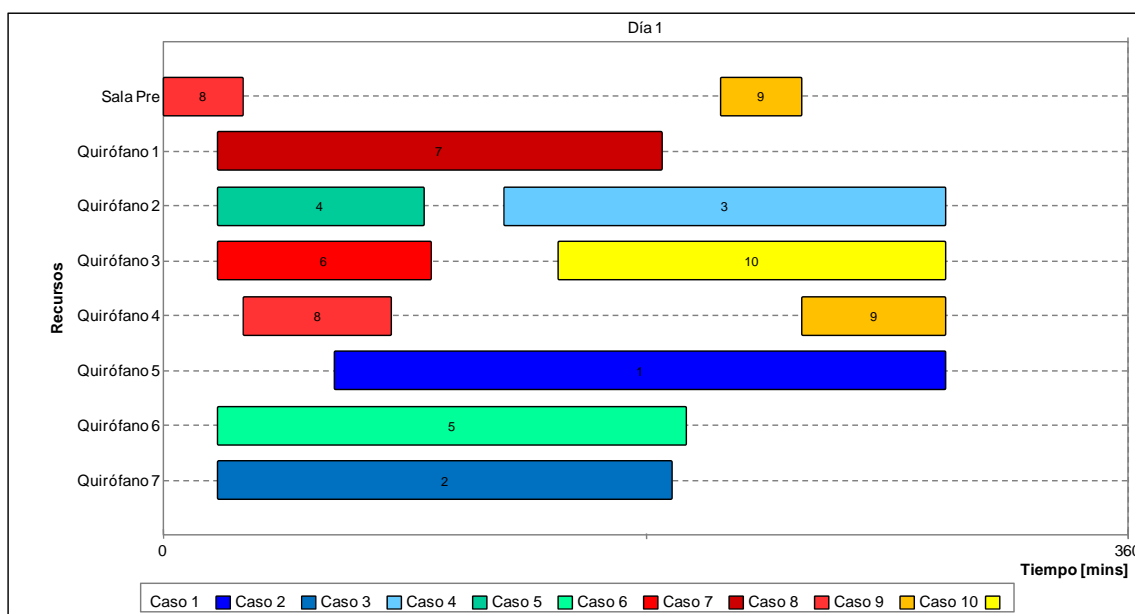


Fig. 2. Planeamiento óptimo del escenario ejemplo

Si bien en la realidad se planifica día a día el uso del servicio de quirófanos, la aplicación de una técnica de modelado matemático como la utilizada en este trabajo permitiría hacer planificaciones en un horizonte más extenso. Un enfoque más extendido en el tiempo llevaría a mejoras más grandes en el *makespan*.

Los escenarios elegidos para la aplicación del modelo matemático corresponden a un horizonte de planeamiento de 5 días de 6 horas. Para su comparación se tomó como escenario base una semana típica de febrero de 2013 donde se realizaron 30 casos, con planeación en bloque. La Fig. 3 muestra el diagrama Gantt de cómo se llevaron a cabo todos los casos de esa semana. La Fig. 3 y las siguientes sólo muestran los tiempos de apertura de los quirófanos, es por ello que el Caso 11 se superpone en el gráfico al Caso 21: el Caso 11 (operación y postoperatorio) se extendieron más allá del horario de cierre del día

1, mientras que el Caso 21 se inició a las 8:00hs del día 2 (a los 360 minutos en el gráfico). El *makespan* de este planeamiento fue de 1721 minutos (12:41hs del día 5).

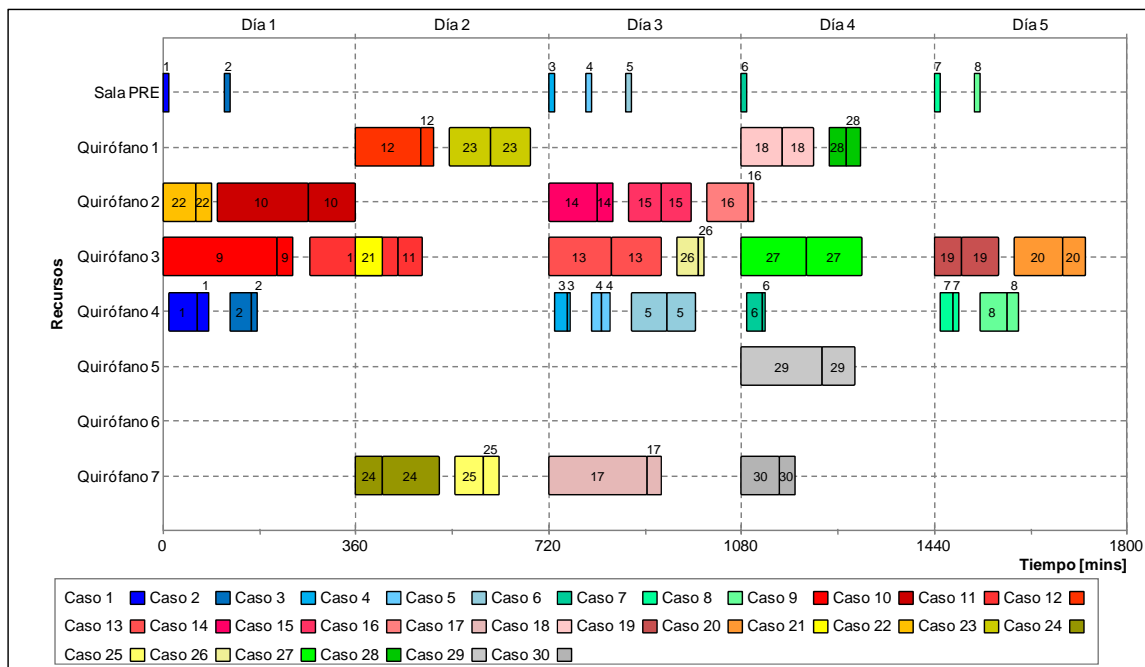


Fig. 3. Planeamiento de un semana típica del servicio de cirugías del H.I.G.A. Penna

Para una semana de 5 días, cada uno con 6 quirófanos posibles, se deben crear $5 \times 6 = 30$ modos disponibles, más 1 modo para tareas de preoperatorio (la ventana de disponibilidad de este modo es toda la semana, más el modo virtual *dummy*). Los escenarios elegidos para la aplicación del modelo son los siguientes:

- *Escenario CR-PQ (Con restricciones – Postoperatorio en quirófanos)*: Se planificó la semana de 30 casos con el modelo matemático, pero respetando las restricciones de días asignados para cada servicio. Esto se logró seleccionando los modos pertinentes a los cuales se asigna cada tarea de operación, el preoperatorio se alinea en el día correspondiente mediante la Ec. (5). Para este escenario se planeó realizar el postoperatorio de cada caso en el mismo quirófano, como se hace actualmente en la realidad. Esto último se logra con la Ec. (14):

$$z_{iQ}^r - z_{iPOST}^r = 0 \quad \forall i_Q, i_{POST} \quad \forall r, i \in I, r \in R_i, (i_Q, i_{POST}) \in O_j \quad (14)$$

- *Escenario CR-PP (Con restricciones – Postoperatorio en Sala de Post)*: Similar al escenario CR-PQ, pero cada tarea de postoperatorio se realiza en la sala de Post

(actualmente sin usar). Se consideró la cantidad de camas de esta sala como infinita, lo que resulta que las tareas de postoperatorio efectivamente desaparecen del modelo. Pero para registrar el uso de camas de Post en este escenario se calculó cuantas camas se utilizan en cada momento durante la semana utilizando la información original de cada caso.

- *Escenario SR-PQ (Sin restricciones – Postoperatorio en quirófanos)*: En este escenario se eliminaron todas las restricciones de pre-asignación de días a servicios, y cada caso puede ser realizado en cualquier día de la semana sin importar a que servicio pertenece. Las tareas de postoperatorio se realizan en los quirófanos.
- *Escenario SR-PP (Sin restricciones – Postoperatorio en Sala de Post)*: Similar al anterior, pero las tareas de postoperatorio se realizan en la Sala de Post. Como en el escenario CR-PP, se calculó el uso de camas de Post.

5. Resultados

La Tabla 6 presenta las estadísticas de la solución de cada uno de los escenarios propuestos. Como comparación, se muestra también cuanto tiempo se dedicó a completar los 30 casos en la vida real.

	Escenarios			
	CR-PQ	CR-PP	SR-PQ	SR-PP
	<i>Makespan</i> de la planificación original: 1721 minutos (12:41hs del día 5)			
F.Obj.: <i>makespan</i>	1421 min (13:41hs del día 4)	1291 min (11:31hs del día 4)	651 min (12:51hs del día 2)	539 min (10:59hs del día 2)
Ecuaciones	21771	13487	295207	21771
Variables (binarias)	7330 (7192)	7300 (7162)	7330 (7192)	7330 (7192)
Tiempo CPU (segs.)	793.6	377.0	20077.4	2419.7

Tabla 6. Estadísticas de la solución de los escenarios elegidos

Los 4 escenarios que fueron resueltos utilizando el modelo matemático presentar ganancias en el tiempo de *makespan*, comparando con lo que necesitó en la realidad. El escenario SR-PP, que tiene total libertad para acomodar las tareas y no hay postoperatorios ocupando los quirófanos logró una reducción del 69%, mientras que los escenarios CR-PQ,

CR-PP y SR-PQ lograron reducciones del 17%, 25% y 62%, respectivamente. Los dos escenarios CR necesitaron mucho menos tiempo de CPU que los escenarios SR para encontrar la solución óptima, aunque la ganancia en ahorro de tiempo fue menor, ya que ambos terminaron el día 4, mientras los escenarios SR finalizaron todas las tareas el día 2.

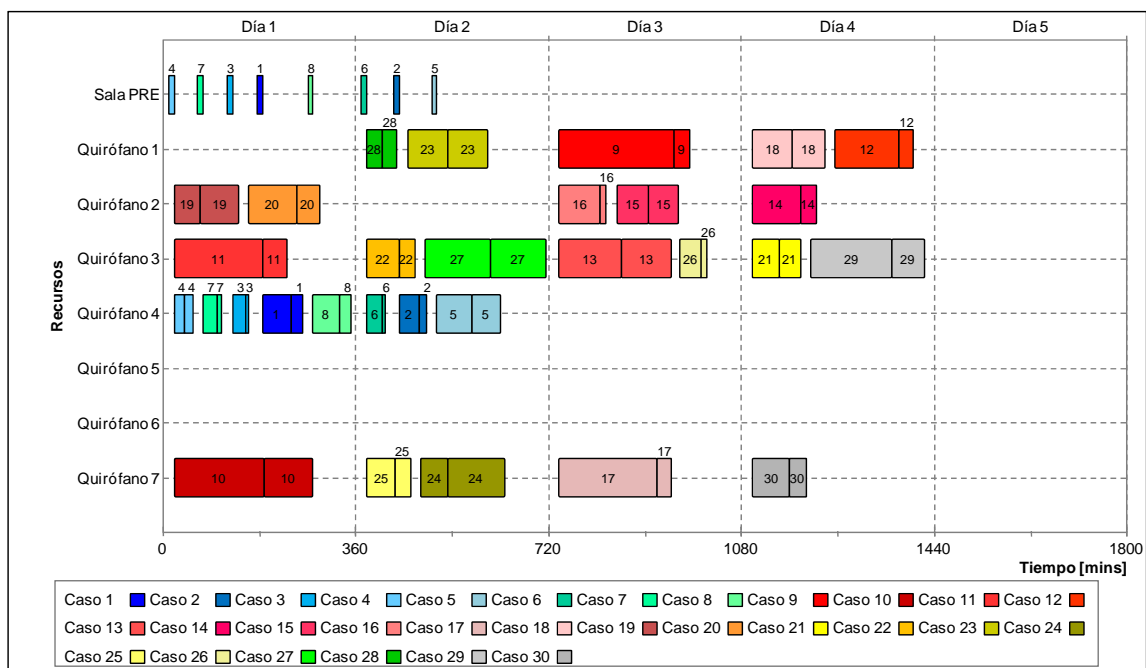


Fig. 4. Solución óptima del escenario CR-PQ

La Fig. 4 presenta la solución óptima del escenario CR-PQ. Si bien se redujo en un día el tiempo de *makespan*, el hecho de respetar los días y quirófanos que se asignan a los diferentes servicios hace que todavía los recursos sean inutilizados: los Quirófanos 5 y 6 no se utilizan en todo el horizonte de planeamiento. Lo mismo sucede en el escenario CR-PP, cuyo planeamiento óptimo se muestra en la Fig. 5. Aunque se eliminó el tiempo ocupado en tareas de postoperatorio en los quirófanos y se redujo aún más el *makespan*, podemos ver sólo el Quirófano 3 es utilizado en forma casi continua. Cabe aclarar que el Quirófano 4 sólo se encarga de anestesia local, las cuales, por su duración corta son relativamente fáciles de acomodar en ambos escenarios.

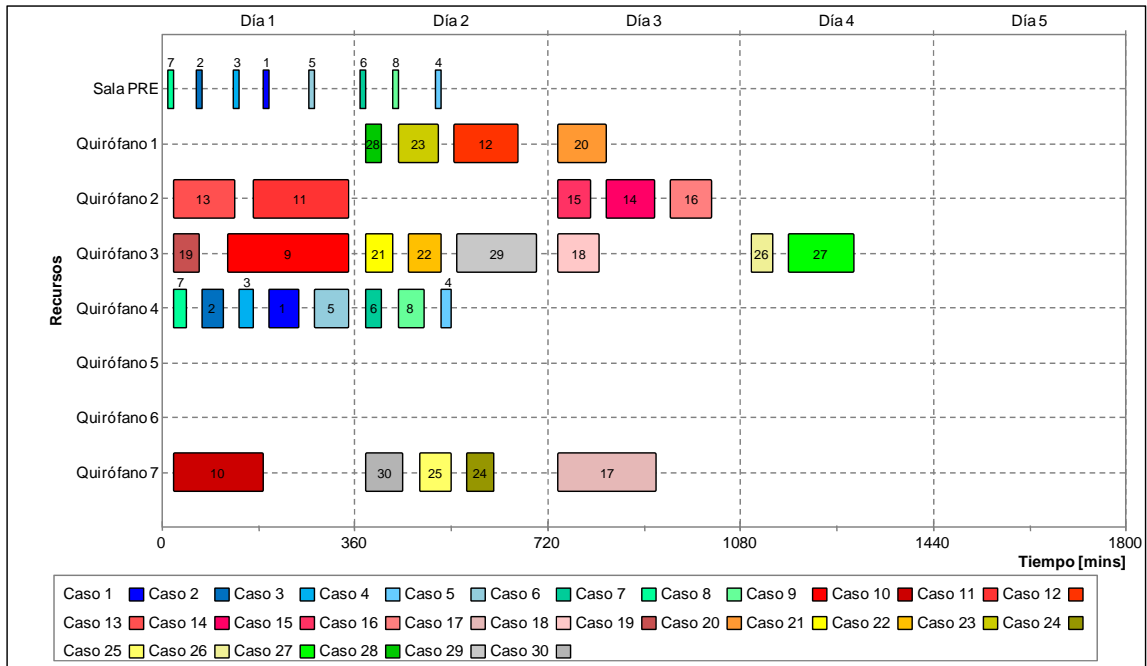


Fig. 5. Solución óptima del escenario CR-PP

El modelo matemático presentado es poco flexible al momento de tener en cuenta límites sobre la utilización de recursos idénticos pero contables, como las camas de la Sala de Post. Para contabilizarlas se debería agregar una gran cantidad de modos al modelo, lo que lo harían casi imposible de resolver en un tiempo razonable. Pero, a partir de los datos de la solución, se calculó la utilización de camas de Post. El resultado se muestra en la Fig. 6, donde se puede ver que el máximo de utilización es de 4 camas al mismo tiempo a mediados del día 2, con dos niveles de 3 camas en el primer y tercer día.

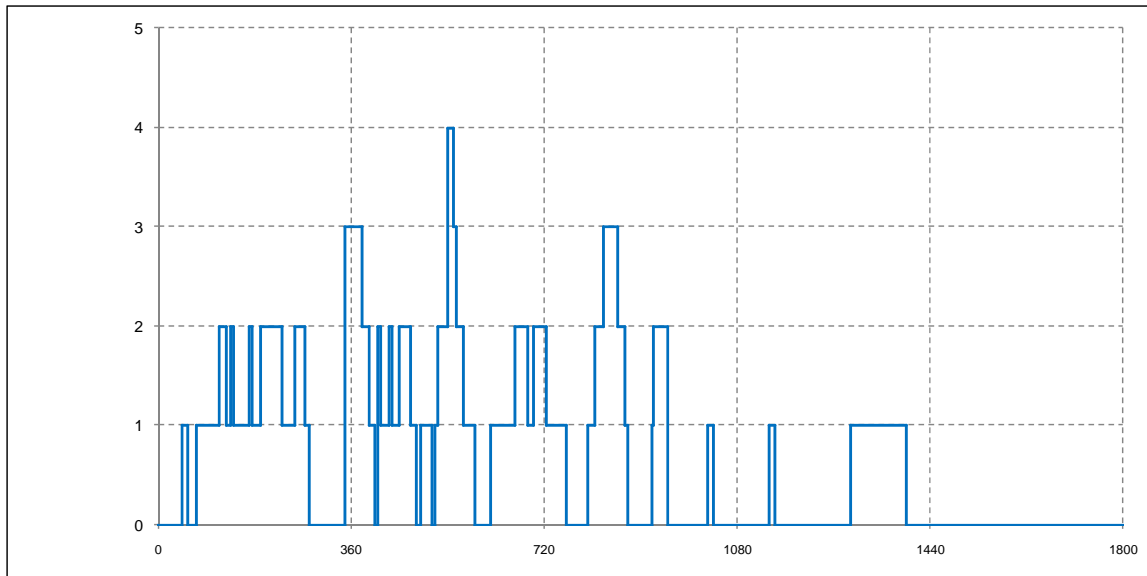


Fig. 6. Utilización de camas de Sala de Post en la solución del escenario CR-PP

Como se ha dicho, los escenarios CR respetan las restricciones de la planificación por bloques y por ello los recursos no son aprovechado totalmente. Los escenarios SR, que no las respetan, lograron reducciones mayores del *makespan*, como se muestra en la Fig. 7 para el escenario SR-PQ y en la Fig. 8 para SR-PP.

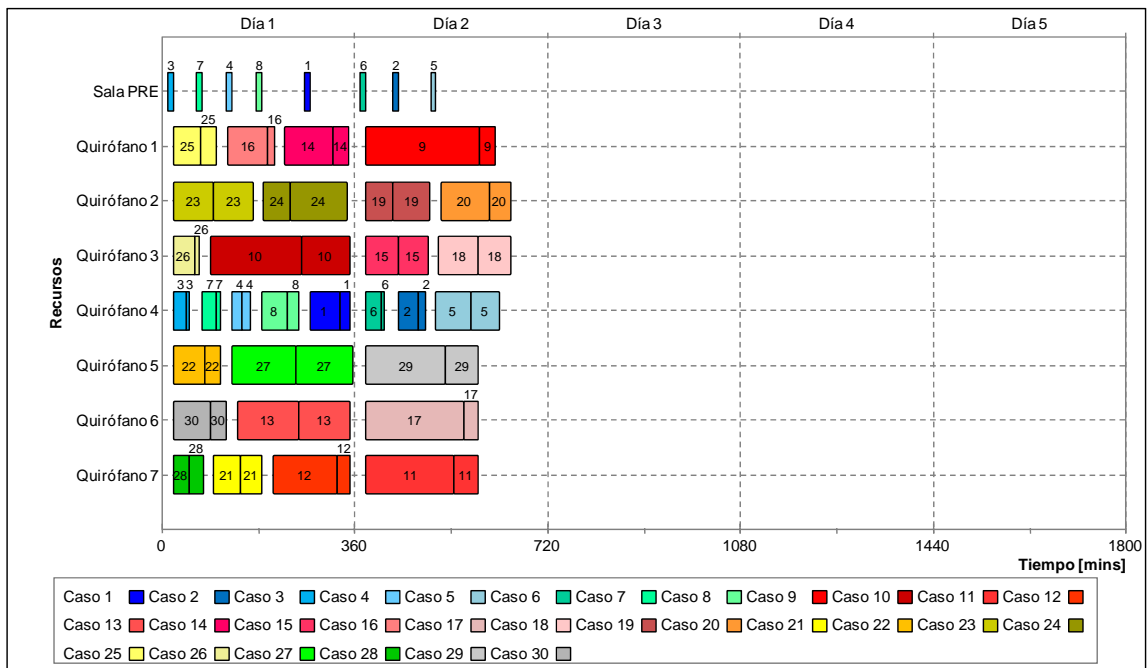


Fig. 7. Solución óptima del escenario SR-PQ

La solución óptima del escenario SR-PP se encuentra mucho más rápido en tiempo de CPU que la perteneciente al escenario SR-PQ. Esto es porque no se consideraron las tareas de postoperatorio, reduciendo en gran medida el tamaño del problema. Pero se debe calcular el uso de camas de Sala de Post para verificar que no sea excesivo. La Fig. 9 presenta el uso en el tiempo de camas Post. El número máximo de camas utilizadas en el mismo momento es de 6 en al final del día 1 de planeamiento, con 3 picos de 5 camas simultáneas.

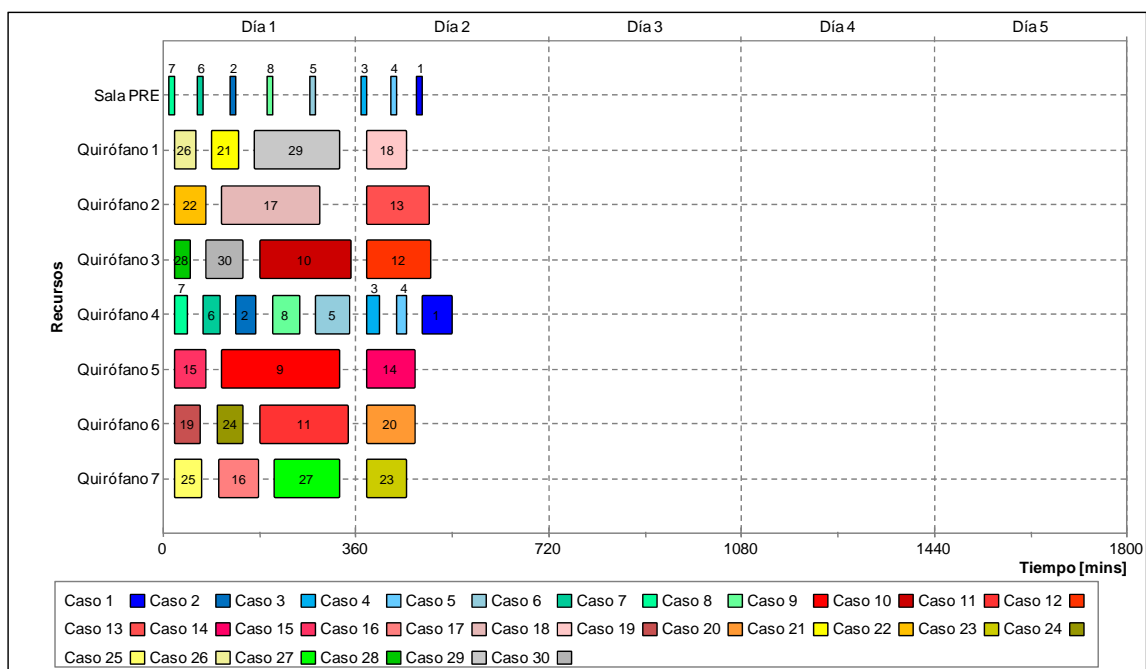


Fig. 8. Solución óptima del escenario SR-PP

Las Figs. 6 y 9 indican que aumentar el número de operaciones a realizar durante un día por la utilización de este modelo aumenta la utilización de camas de Post simultáneas. Además, los máximos de utilización no son demasiado altos y están dentro de las posibilidades del H.I.G.A. Penna. Pero, las diferencias entre los *makespans* de los escenarios CR-PQ/CR-PP (9.1%) y SR-PQ/SR-PP (17.2%) demuestran que el beneficio de utilizar camas de Post en vez de los quirófanos no es tan remarkable.

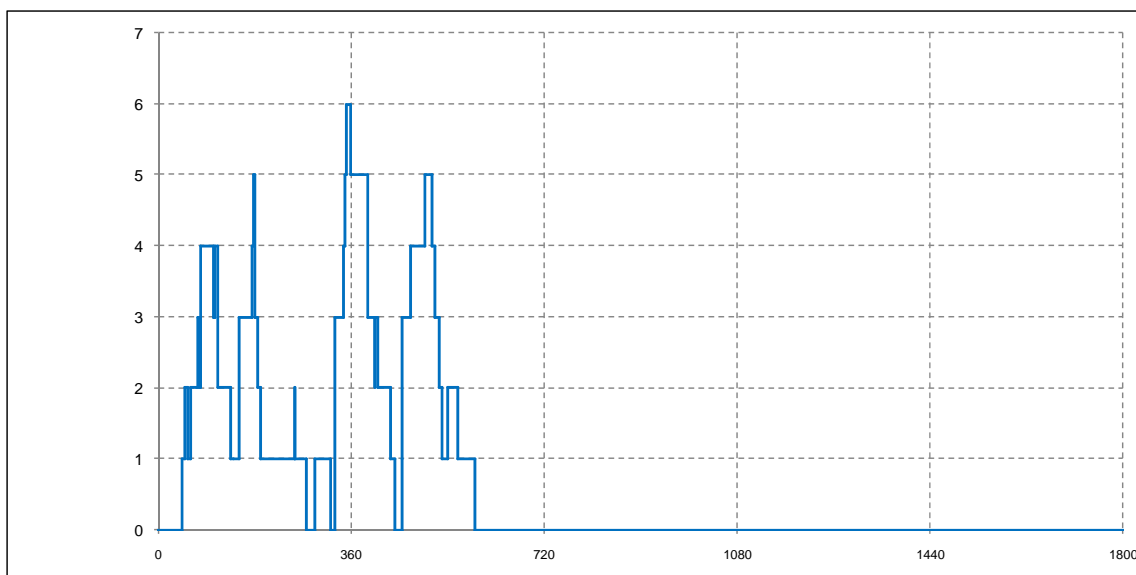


Fig. 9. Utilización de camas de Sala de Post en la solución del escenario SR-PP

6. Conclusiones

En este trabajo se utilizó un modelo matemático extraído de la literatura para la optimización de los recursos de quirófanos en hospitales públicos aplicado a un caso real. El caso elegido fue el Servicio de Cirugía del hospital público de alta complejidad Hospital Interzonal General de Agudo Dr. José Penna, de la ciudad de Bahía Blanca (Buenos Aires). El modelo resultante fue de tipo mixto entero-lineal (MILP) de gran tamaño, el cual fue resuelto por el paquete de modelado matemático y solver de *optimización* GAMS/Gurobi.

Tradicionalmente, la planificación en este servicio se hace día a día y por el método de planificación en bloques, donde los diferentes servicios del hospital tienen pre-asignados días de la semana y quirófanos.

Se comparó la aplicación del modelo a la resolución del problema de planificación de corto plazo de las tareas a realizarse en el servicio con el método tradicional en bloques, para una semana típica de 2013.

Se demostró que el enfoque propuesto logra reducciones del tiempo necesario para completarlas a todas (*makespan*). Estas reducciones llegaron a ser del 69% con respecto al tiempo que se necesitó en la vida real.

También se demostró la utilidad del enfoque para estudiar el impacto del agregado o no de recursos, específicamente camas de Postoperatorio. El hospital cuenta con una sala de este tipo con varias camas pero no es utilizado por cuestiones de personal. El presente trabajo demostró que si bien la habilitación de esta sala puede lograr aún mayores reducciones en el *makespan*, las mejoras no superan el 20%.

Como un problema a tener en cuenta en próximos trabajos es la importancia de lograr incluir alguna estrategia para tener en cuenta las emergencias; ya que por tratarse de un trabajo para un hospital público el número de casos a diario es muy importante.

Referencias

Antomil Ibias J., Arenas Parra M., Bilbao Terol A., Pérez Glandish B., Rodríguez Uría M.V. (2004) “Planificación óptima de la actividad quirúrgica en hospitales públicos mediante un modelo de Programación Compromiso Posibilística”. url: http://www.uv.es/asepuma/recta/extraordinarios/Vol_02/16.pdf

GAMS. A User’s Guide. GAMS Development Corporation (2012).

Jansson M., Axel A., Delgado C. (2000) “Optimización del proceso de Cirugía en Hospitales públicos. Una aplicación de la modelación matemática entera en la prestación de atención quirúrgicas en el Hospital del Salvador, Santiago de Chile”. *Pharos* 7 (1), Mayo-Junio. Universidad de Las Américas (Chile).

Macario A., Vitez T.S., Dunn B., McDonald T. (1995) “Where are costs in perioperative? Analysis of hospital costs and charges for inpatient surgical care”. *Anesthesiology* 83 (6), pp. 1138–1144.

Pham D., Klinkert A. (2008) “Surgical case scheduling as a generalized job shop scheduling problem”. *European Journal of Operational Research* 185, pp. 1011-1025.

Reveco C., Weber R. (2011) “Gestión de Capacidad en el Servicio de Urgencia en un Hospital Público”. *Revista Ingeniería de Sistemas XXV*, pp. 57-75.

Wolff Rojas P.A. (2011) “Modelos de Programación Matemática para Asignación de Pabellones Quirúrgicos en Hospitales Públicos”. url: <http://tesis.uchile.cl/handle/2250/102774>

Agradecimientos: los autores del trabajo desean agradecer a la Univ. Nacional del Sur y al CONICET por el apoyo financiero, y a las autoridades del Hospital Regional de Agudos “Dr. José Penna” y de la Región Sanitaria I de la Prov. de Bs.As. por facilitar la información para la realización del mismo.