

Modelos para la resolución de la programación de quirófanos*

José Manuel Molina Pariente¹, José Manuel Framiñán Torres¹, Paz Pérez González¹,
José Miguel León Blanco¹

¹ Dpto. de Organización. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla. Camino de los Descubrimientos s/n. 41092. Sevilla. jmolinap@esi.us.es, jose@esi.us.es, pazperez@esi.us.es, miguel@esi.us.es.

Keywords: planificación, quirófanos, programación lineal

1. Introducción

La planificación quirúrgica es un proceso de toma de decisiones empleado en la programación de quirófanos -*Operating Rooms* (ORs)-, que puede estructurarse en tres fases (Testi et al. ,2007). En lo que respecta a la Dirección del hospital, hace referencia a cómo distribuir el tiempo de OR disponible entre las unidades quirúrgicas, es decir: en qué cantidad (*Session Planning Problem* o SPP) y cuándo (*Master Surgical Schedule* o MSS) las unidades dispondrán de ORs para llevar a cabo las intervenciones. En lo que respecta al nivel de unidad quirúrgica, las decisiones a tomar son cómo distribuir el tiempo asignado por la Dirección del hospital, además de asignar a cada paciente una fecha en la que se realizará la operación (*Elective Case Scheduling* o ECS).

En la fase SPP, las horas disponibles de OR son repartidas entre las distintas unidades quirúrgicas que componen el hospital. El principal aspecto a considerar en esta fase es la estimación de la demanda de las horas de OR requeridas por cada unidad quirúrgica. (Testi et al. ,2007) sugiere que la demanda puede ser estimada a partir de: la demanda histórica (es decir, número de horas de OR asignadas a la unidad quirúrgica en horizontes de planificación anteriores, ver (Blake et al. ,2002)) y el número de horas de OR necesarias para limpiar la lista de espera de la unidad quirúrgica.

En la fase MSS, los turnos de OR disponibles son asignados a las unidades quirúrgicas. El objetivo general es ajustar los turnos de OR asignados con la demanda de la unidad quirúrgica calculada en la fase SPP.

La literatura relacionada con la fase MSS es escasa (Testi et al. ,2007). Los objetivos tratados en la literatura son: minimizar la diferencia entre las horas de OR asignadas en la fase MSS y las establecidas en la fase SPP (Blake et al. ,2002), maximizar la preferencia del cirujano por operar en un determinado día sobre un horizonte de planificación semanal (Testi et al. ,2007), minimizar la diferencia entre las horas asignadas y las horas de OR solicitadas por la unidad quirúrgica (Chaabane et al. ,2006), minimizar el pico de camas utilizadas y maximizar el número de pacientes intervenidos en cada hospital de un sistema hospitalario (Santibáñez et

* Este trabajo deriva de la participación de los autores en el proyecto de investigación "(OR)2 - Operations Research & Operation Room" (ACC-300100-07-5) financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia de España y en el contrato de investigación "VIRSSPA" (OG-174/07) financiado por la Fundación Reina Mercedes.

al. ,2007) y minimizar la escasez de camas en las instalaciones a través de las que pasa el paciente durante el proceso quirúrgico (Beliën and Demeulemeester ,2007).

La fase ECS se centra en la planificación y programación de los pacientes en lista de espera de la unidad quirúrgica. En general, esta fase es resuelta en dos etapas: una primera etapa (*Advance Scheduling*) que se refiere a la asignación de pacientes a turnos de OR, mientras que en la segunda etapa (*Allocation Scheduling*) se programan las operaciones que han sido asignadas dentro de cada turno de OR.

En este trabajo, nos centramos en la etapa de *advance scheduling*. Las políticas empleadas para la resolución de esta etapa son: P-S-OR y P-OR-S. En la primera, el paciente es asignado en primer lugar a un cirujano y posteriormente este conjunto es asignado a un turno de OR. En la segunda, el paciente es asignado a un turno de OR y posteriormente se asigna a cada OR un cirujano para realizar todas las intervenciones asignadas en cada turno.

El objetivo de este trabajo es desarrollar modelos de programación lineal para, por un lado, resolver de forma simultánea las fases de SPP y MSS y, por otro lado, evaluar y comparar diferentes políticas de planificación de ORs.

2. Modelos de programación lineal para la resolución de las fases SPP y MSS

La resolución de los problemas anteriores ha sido tratada en la literatura de forma escasa (Testi et al. ,2007), como puede verse en la Tabla 1. En estos trabajos, la resolución de las fases SPP y MSS se realiza de forma independiente. No obstante, puesto que la duración total de los turnos asignados a las unidades quirúrgicas en la fase MSS no puede ser superior a las horas asignadas en la fase SPP, estas dos fases están directamente relacionadas. En este trabajo, se propone un modelo de programación lineal entera para abordar la resolución simultánea de ambas fases en un sistema hospitalario (conjunto de hospitales). El objetivo es maximizar el tiempo de OR asignado a cada una de las unidades quirúrgicas que componen el sistema hospitalario en función de una ponderación definida a partir del volumen de intervenciones realizadas en el horizonte de planificación anterior. Las unidades quirúrgicas solo podrán ser asignadas a ORs ubicados en el hospital al que pertenecen. Para que el reparto de tiempo de OR entre todas las unidades quirúrgicas de un hospital esté equilibrado, se establece que el tiempo de OR asignado a cada unidad debe ser superior a un límite fijado por la Dirección del hospital. En el modelo se asume que los turnos de quirófanos están divididos en bloques de tiempo (BT) que podrán ser ocupados por diferentes unidades quirúrgicas. Debido a los largos tiempos de set-up y los grandes costes, el número de BTs en los que se divide un turno de OR en aplicaciones reales es 1 o 2 (Beliën and Demeulemeester ,2007). En este trabajo se considera que el turno de OR se divide en 2 BTs que podrían ser ocupados por diferentes unidades. Hay que tener en cuenta que el número de ORs asignados a una unidad quirúrgica en un determinado turno debe ser igual o inferior al número de cirujanos disponibles para operar en la unidad en dicho turno.

Tabla 1. Resolución fases SPP y MSS

Fase	SSP	MSS
Ref.	(Testi et al. ,2007)	(Beliën and Demeulemeester ,2007;Santibáñez et al. ,2007;Testi et al. ,2007;Chaabane et al. ,2006;Blake et al. ,2002)

A continuación se presenta el modelo de programación lineal para la resolución simultánea de las fases SPP y MSS, describiéndose brevemente los parámetros y variables utilizados.

Parámetros

n^U : número de unidades quirúrgicas en el sistema hospitalario.

n^R : número de quirófanos en el sistema hospitalario.

n^{BT} : número de BTs en los que se divide el turno de OR.

n^T : número de turnos en el horizonte de planificación.

D_i : demanda de tiempo de OR de la unidad quirúrgica i , $i=1 \dots n^U$

W_i : ponderación asignada a la unidad quirúrgica i , $i=1 \dots n^U$

S_{it} : número de cirujanos disponibles para operar en la unidad quirúrgica i en el turno t , $i=1 \dots n^U$ y $t=1 \dots n^T$

α_{ir} : 1 si la unidad quirúrgica i puede ser asignada al OR r , 0 en caso contrario; $i=1 \dots n^U$ y $r=1 \dots n^R$

C_{rt} : capacidad (en minutos) del OR r en el turno t , $r=1 \dots n^R$ y $t=1 \dots n^T$

l : duración (en minutos) del BT.

lb : límite inferior de tiempo de OR asignado a una unidad quirúrgica.

nsu : número máximo de unidades quirúrgicas que pueden ocupar un quirófano en un turno.

Variables

Δ_{ijrt} : 1 si la unidad quirúrgica i está asignada al BT j del OR r en el turno t , 0 en otro caso; $i=1 \dots n^U$, $j=1 \dots n^{BT}$, $r=1 \dots n^R$ y $t=1 \dots n^T$

Γ_{irt} : 1 si la unidad quirúrgica i está asignada al OR r en el turno t , 0 en caso contrario; $i=1 \dots n^U$, $r=1 \dots n^R$ y $t=1 \dots n^T$

X_{irt} : número de BTs asignados a la unidad quirúrgica i en el OR r en el turno t , $i=1 \dots n^U$, $r=1 \dots n^R$ y $t=1 \dots n^T$

Y_i : tiempo de OR asignado a la unidad quirúrgica i , $i=1 \dots n^U$

Z_i : proporción de tiempo de OR asignado a la unidad quirúrgica i , $i=1 \dots n^U$

El modelo de programación lineal entera mixto es:

$$\text{Maximizar } \sum_{i=1}^{n^U} Y_i W_i \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^{n^U} \Gamma_{irt} \leq nsu \quad (1 \leq r \leq n^R, 1 \leq t \leq n^T) \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{n^{BT}} \Delta_{ijrt} \leq n^{BT} \Gamma_{irt} \quad (1 \leq i \leq n^U, 1 \leq r \leq n^R, 1 \leq t \leq n^T) \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{n^{BT}} \Delta_{tjrc} \alpha_{tr} = X_{trc} \quad (1 \leq l \leq n^U, 1 \leq r \leq n^R, 1 \leq t \leq n^T) \quad (4)$$

$$\sum_{r=1}^{n^R} X_{trc} \leq n^{BT} S_{tr} \quad (1 \leq l \leq n^U, 1 \leq t \leq n^T) \quad (5)$$

$$\sum_{l=1}^{n^U} X_{trc} l \leq C_{trc} \quad (1 \leq r \leq n^R, 1 \leq t \leq n^T) \quad (6)$$

$$\sum_{r=1}^{n^R} \sum_{t=1}^{n^T} X_{trc} l = Y_l \quad (1 \leq l \leq n^U) \quad (7)$$

$$Z_l = Y_l / D_l \quad (1 \leq l \leq n^U) \quad (8)$$

$$lb \leq Z_l \leq 1 \quad (1 \leq l \leq n^U) \quad (9)$$

$$A_{tjrc} \in \{0,1\} \quad (1 \leq l \leq n^U, 1 \leq j \leq n^{BT}, 1 \leq r \leq n^R, 1 \leq t \leq n^T) \quad (10)$$

$$F_{trc} \in \{0,1\} \quad (1 \leq l \leq n^U, 1 \leq r \leq n^R, 1 \leq t \leq n^T) \quad (11)$$

La ecuación (1) es la función objetivo. Las restricciones (2) aseguran que cualquier OR en cualquier turno es ocupado por un número máximo de unidades quirúrgicas. Las restricciones (3) establecen los ORs que ocupan cualquier unidad en cualquier turno. Las restricciones (4) establecen el número de BTs asignados a una unidad quirúrgica en cualquier OR y turno del horizonte de planificación. Las restricciones (5) prohíben que, en un turno, se asignen más ORs que cirujanos tenga disponible para operar la unidad. Las restricciones (6) son restricciones de capacidad de OR. Las restricciones (7) definen el tiempo de OR asignado a una unidad quirúrgica en el horizonte de planificación. La proporción de tiempo de OR asignado a una unidad viene definida como el cociente entre el tiempo de OR asignado y la demanda de la unidad (Ecuación (8)) teniendo que ser superior a un límite inferior (*lb*) e inferior o igual a 1 (Ecuación (9)). Las restricciones (10-11) aseguran la integridad de las variables.

3. Modelos de programación lineal para la resolución de la fase ECS

En la fase ECS, el problema consiste en la determinación de un programa que especifique el número de intervenciones programadas en el horizonte de planificación, junto con la fecha y el OR en el que se realizará. El objetivo de este programa es maximizar la calidad de servicio de la unidad quirúrgica y que la fecha de operación de cada paciente en lista de espera sea inferior a una fecha límite fijada en función del diagnóstico del paciente. La calidad de servicio se define como la suma de los cocientes entre la ponderación clínica y la fecha de operación de los pacientes programados. La ponderación clínica de un paciente depende de la prioridad clínica y del número de días en lista de espera del paciente. La prioridad clínica depende de las características de la enfermedad del paciente, pudiendo ser *normal* (1) o *preferente* (2-5), donde 5 es el nivel máximo de prioridad. Respecto a la fecha límite, el Sistema Sanitario establece, en base al diagnóstico del paciente, un número máximo de días

en los que el paciente debe ser operado. Este periodo recibe el nombre de *tiempo de respuesta quirúrgica*. Por tanto, cada paciente tiene una fecha límite definida como la diferencia entre el tiempo de respuesta quirúrgica y el número de días que transcurren desde que entró en la lista de espera y se planifican las intervenciones.

Con el fin de conseguir el objetivo propuesto, se pueden considerar diferentes criterios: uno podría ser planificar el mayor número de intervenciones en el horizonte de planificación, mientras que otro podría ser priorizar las intervenciones de aquellos pacientes que presenten mayor ponderación clínica. Estos criterios son incorporados a través del parámetro k , que es el exponente de la ponderación clínica en la función objetivo. De forma que, si $k=1$ se considera el primer criterio, mientras que si $k>1$ se considera el segundo criterio.

En este trabajo se considera que la lista de espera está constituida por dos tipos de intervenciones: intervenciones *estándar* y de *microcirugía*. Las principales diferencias entre las intervenciones estándar y de microcirugía son la duración quirúrgica de la intervención y los recursos quirúrgicos necesarios para realizar la intervención. La duración de una intervención de microcirugía es mayor que la duración de la intervención estándar, debido a que es más compleja. Por esta razón, la intervención de microcirugía es realizada por tres cirujanos mientras que la estándar es realizada por uno.

En la Tabla 2, se muestra una comparación entre los modelos de programación de ORs existentes en la literatura y los desarrollados en este trabajo.

Tabla 2. Características de los modelos empleados en la literatura para la resolución de la fase ECS

Modelo	Objetivo	Hipótesis						
		1	2	3	4	5	6	7
(Fei et al. ,2008)	Minimizar los costes fijos asociados a la intervención.							x
(Guinet and Chaabane ,2003)	Minimizar el retraso quirúrgico	x		x	x			x
(Hans et al. ,2008)	Maximizar la utilización del OR.					x		
(Jebali et al. ,2006)	Minimizar los costes fijos asociados a la intervención.	x		x				x
(Marcon et al. ,2003)	Minimizar el riesgo de no realización de una intervención	x				x		
(Ogulata and Erol ,2003)	Maximizar la utilización del OR.		x					
(Ozkarahan ,2000)	Programación por metas.		x	x				
(Perdomo et al. ,2006)	Minimizar el makespan							
(Pham and Klinkert ,2008)	Minimizar el makespan	x		x				
(Sier et al. ,1997)	Multiobjetivo		x					
P-S-OR	Maximizar la calidad de servicio de la unidad quirúrgica.	x	x	x	x	x	x	x
P-OR-S	Maximizar la calidad de servicio de la unidad quirúrgica.		x	x	x		x	x

Las hipótesis en la Tabla 2 son: (1) garantizar la continuidad asistencial del paciente, (2) la asignación de una ponderación clínica a cada paciente, (3) los pacientes serán asignados a ORs donde puedan ser realizadas las intervenciones, (4) la disponibilidad de los cirujanos para realizar operaciones, (5) la limitación en el número máximo de ORs diferentes que le pueden ser asignados a un cirujano en cualquier turno, (6) la planificación de intervenciones que requieren distintas cantidades de recursos quirúrgicos y (7) la consideración de una fecha límite para realizar la intervención.

3.1. Modelo de programación lineal

En este apartado se presenta el modelo de programación lineal para la planificación de operaciones en base a la política P-S-OR. Hay que apuntar que para la política P-OR-S se ha desarrollado un modelo similar, con las siguientes consideraciones: el paciente no tiene

asignado ningún cirujano y a cada turno de OR hay que asignarle un cirujano para que realice las operaciones.

Parámetros

n^S : número de cirujanos en la unidad quirúrgica.

n^P : número de pacientes en la lista de espera de la unidad quirúrgica.

n^{SH} : número de turnos en el horizonte de planificación.

n^R : número de ORs disponibles en la unidad quirúrgica.

n^{SHM} : número de turnos de microcirugía en el horizonte de planificación.

d_i : duración estimada (en minutos) de la intervención del paciente i , $i = 1 \dots n^P$. Esta duración incluye tanto la duración quirúrgica como el tiempo de preparación del OR para la realización de la intervención.

dl_i : fecha límite del paciente i , $i = 1 \dots n^P$

w_i : ponderación clínica del paciente i , $i = 1 \dots n^P$

k : exponente de la función objetivo, valor entero.

δ_{ir} : 1 si la intervención i puede ser realizada en el OR r , 0 en otro caso; $i = 1 \dots n^P$ y $r = 1 \dots n^R$. La intervención podrá ser realizada únicamente en aquellos ORs en los que esté disponible el equipo necesario para realizar la intervención.

μ_{ij} : 1 si la intervención i ha sido asignada al cirujano j , 0 en otro caso; $i = 1 \dots n^P$ y $j = 1 \dots n^S$. Este parámetro es definido únicamente para la política P-S-OR, ya que en la política P-OR-S el paciente no tiene asignado cirujano.

c_{jt} : tiempo (en minutos) que el cirujano j está disponible en el turno t , $j = 1 \dots n^S$ y $t = 1 \dots n^{SH}$

ubr : máximo número de ORs diferentes que puede ser asignado a un cirujano en cualquier turno del horizonte de planificación. En la política P-S-OR, el número máximo de ORs diferentes que pueden ser asignado a un cirujano es 2, mientras que en la política P-OR-S es 1.

l_{rt} : duración del turno de OR r en el turno t , $r = 1 \dots n^R$ y $t = 1 \dots n^{SH}$

D : diferencia (en minutos) entre un turno de OR estándar y de microcirugía.

LS : duración (en minutos) de un turno de OR estándar.

Variabes

X_{jrt} : 1 si el cirujano j es asignado al OR r en el turno t , 0 en otro caso;

$j = 1 \dots n^S$, $t = 1 \dots n^{SH}$ y $r = 1 \dots n^R$

Z_{ijrt} : 1 si el paciente i del cirujano j es operado en el turno t en el OR r , 0 en otro caso; $i = 1 \dots n^P$, $j = 1 \dots n^S$, $r = 1 \dots n^R$ y $t = 1 \dots n^{SH}$

M_{jt} : 1 si el cirujano j es asignado al turno de microcirugía en el turno t , 0 en otro caso;

$j = 1 \dots n^S$ y $t = 1 \dots n^{SH}$

D_{jrt}^{BT} : duración (en minutos) del bloque de tiempo asignado al cirujano j en el OR r en el turno t , $j = 1 \dots n^S$, $r = 1 \dots n^R$ y $t = 1 \dots n^{SH}$

El modelo de programación lineal entero mixto es:

$$\text{Maximizar } \sum_{t=1}^{n^{SH}} \frac{1}{t} \left(\sum_{i=1}^{n^P} \sum_{j=1}^{n^S} \sum_{r=1}^{n^R} Z_{tjrc} \mu_{ij} \delta_{tr} w_i^k \right) \quad (12)$$

Sujeto a:

$$D_{jrc}^{BT} = \sum_{t=1}^{n^P} Z_{tjrc} \mu_{ij} \delta_{tr} d_t \quad (1 \leq j \leq n^S, 1 \leq t \leq n^{SH}, 1 \leq r \leq n^R) \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^{n^S} D_{jrc}^{BT} \leq l_{rc} \quad (1 \leq t \leq n^{SH}, 1 \leq r \leq n^R) \quad (14)$$

$$\sum_{r=1}^{n^R} D_{jrc}^{BT} < c_{jc} + D M_{jc} \quad (1 < j < n^S, 1 < t < n^{SH}) \quad (15)$$

$$\sum_{t=1}^{n^{SH}} \sum_{j=1}^{n^S} M_{jc} = n^{SHM} \quad (16)$$

$$\sum_{r=1}^{n^R} X_{jrc} \leq ubr \quad (1 \leq j \leq n^S, 1 \leq t \leq n^{SH}) \quad (17)$$

$$\sum_{t=1}^{n^{SH}} \sum_{r=1}^{n^R} Z_{tjrc} \mu_{ij} \delta_{tr} \leq 1 \quad (1 \leq t \leq n^P, 1 \leq j \leq n^S / dl_t > n^{SH}) \quad (18.1)$$

$$\sum_{t=1}^{n^{SH}} \sum_{r=1}^{n^R} Z_{tjrc} \mu_{ij} \delta_{tr} = 1 \quad (1 \leq t \leq n^P, 1 \leq j \leq n^S / dl_t \leq n^{SH}) \quad (18.2)$$

$$\sum_{t=1}^{n^{SH}} \sum_{r=1}^{n^R} Z_{tjrc} \mu_{ij} \delta_{tr} * t \leq dl_t \quad (1 \leq t \leq n^P, 1 \leq j \leq n^S / dl_t \leq n^{SH}) \quad (19)$$

$$\sum_{t=1}^{n^P} \sum_{j=1}^{n^S} \sum_{r=1}^{n^R} \sum_{c=1}^{n^R} Z_{tjrc} \mu_{ij} \delta_{tr} = n^{SHM} \quad (d_t > LS) \quad (20)$$

$$Z_{tjrc} \in \{0,1\} \quad (1 \leq t \leq n^P, 1 \leq j \leq n^S, 1 \leq r \leq n^R, 1 \leq t \leq n^{SH}) \quad (21)$$

$$X_{jrc} \in \{0,1\} \quad (1 \leq j \leq n^S, 1 \leq r \leq n^R, 1 \leq t \leq n^{SH}) \quad (22)$$

$$M_{jt} \in \{0,1\} \quad (1 \leq j \leq n^S, 1 \leq t \leq n^{SH}) \quad (23)$$

La ecuación (12) es la función objetivo. Las restricciones (13) definen la duración del BT asignado a un cirujano para realizar sus operaciones en cualquier OR y turno. Las restricciones (14) prohíben que la suma de las duraciones de los BTs asignados a los cirujanos en cualquier OR y turno sea mayor que la capacidad del OR en dicho turno. Las restricciones (15) prohíben que la suma de las duraciones de los BTs asignados a un cirujano en un turno sea mayor que la disponibilidad del mismo para operar en dicho turno. Las restricciones (16) aseguran que el número de turnos en los que los cirujanos operan intervenciones de microcirugía es igual al número de turnos de microcirugía disponibles en el horizonte de planificación. Las restricciones (17) limitan el número máximo de ORs que se le pueden asignar a un cirujano en cualquier turno. Las siguientes restricciones imponen que las intervenciones sean realizadas una sola vez: si la fecha límite del paciente no está dentro del horizonte de planificación, el paciente podrá o no ser operado (Ecuación 18.1). Sin embargo, si la fecha límite del paciente está dentro del horizonte de planificación, el paciente debe ser operado (Ecuación 18.2). Las restricciones (19) aseguran que los pacientes con la fecha límite dentro del horizonte de planificación deben ser operados antes de sus fechas límite. Como se ha descrito anteriormente, la duración de la intervención de microcirugía es mayor que la de la intervención estándar y la ponderación clínica depende de la prioridad clínica y del número de días en lista de espera. Por tanto, basándonos en los criterios propuestos en este trabajo, los modelos siempre excluirán las intervenciones de microcirugía del programa. Por esta razón, la restricción (20) especifica que el número de intervenciones de microcirugía realizadas debe ser igual al número de turnos de microcirugía disponibles en el horizonte de planificación. Las restricciones (21-23) aseguran la integridad de las variables.

4. Experimentos

Con el fin de evaluar y comparar las políticas propuestas, se han utilizado datos reales de intervenciones realizadas en la unidad quirúrgica de Cirugía Plástica del Hospital Universitario “Virgen del Rocío” sobre el periodo transcurrido desde Marzo hasta Junio del 2008. La unidad de Cirugía Plástica está formada por 16 cirujanos que pueden realizar cualquier tipo de intervención, por lo que no existe restricción alguna a la hora de asignar pacientes a cirujanos en la política P-S-OR. La unidad cuenta con 4 ORs, 3 en el turno de mañana (Q51T, Q52T, Q55T) y 1 en el turno de tarde (QTT). La duración del turno de mañana es de 390 minutos, excepto en el turno de mañana del miércoles donde la unidad realiza intervenciones de microcirugía. En este caso, la duración del turno es de 600 minutos. La duración del turno de tarde es de 300 minutos.

Las políticas propuestas han sido comparadas en horizontes de planificación de una semana y un mes, excluyendo del estudio los pacientes de cirugía ambulatoria y emergencias. Puesto que los pacientes que se tienen en cuenta en este trabajo ya han sido operados, no es necesario tener en cuenta el cumplimiento de la fecha límite.

En el primer problema (P1), se realiza una comparación entre el programa real llevado a cabo en la unidad de Cirugía Plástica y los programas propuestos por los modelos desarrollados. En el segundo problema (P2), se toma como entrada al modelo listas de esperas constituidas por pacientes operados en el horizonte de planificación H_i más los pacientes operados en el horizonte H_{i+1} . Los problemas han sido resueltos con el software PARALLEL CPLEX en un equipo con un procesador Intel Core 2 Quad Q6600, 2,40 GHz con 4,00 GB de RAM. Los problemas que en la Tabla 3 aparecen con un * han sido resueltos en un tiempo de computación de 8.5 horas, mientras que el resto de problemas han sido resueltos en un tiempo inferior.

Seguidamente, la Tabla 3 muestra los programas propuestos por los modelos para el problema P2, indicando el número de pacientes programados en el horizonte de planificación.

Tabla 3. Programa de intervenciones (Problema P2)

Horizonte (Abril 2008)	Programa real	P-S-OR (k=1)	P-S-OR (k=2)	P-OR-S
01-07	37	63	63	65
08-14	28	46	47	61
15-21	48	83	82	86
22-31	65	87	87	95
01-31	178	238*	237*	240

5. Conclusiones

Los programas propuestos por los modelos para cada una de las políticas ofrecen mejores resultados que el programa real realizado de forma manual por el programador de los OR en la unidad de Cirugía Plástica. La política P-OR-S ofrece mejores resultados que la política P-S-OR, ya que es más flexible. A la vista de los resultados, una futura línea de investigación sería evaluar el impacto sobre la lista de espera de una política híbrida entre las políticas P-S-OR y P-OR-S. Además, otras futuras líneas de investigación podrían ser la inclusión de las fases de preoperatorio y postoperatorio en los modelos y el estudio de técnicas para la estimación de las duraciones de las intervenciones.

Referencias

- Testi, A.; Tanfani, E.; Torre, G. (2007). A three-phase approach for operating theatre schedules. *Health Care Management Science*, Vol 10, No. 2, pp. 163-172.
- Blake, J.T.; Donald, J.; Ball, S. (2002). Mount Sinai hospital uses integer programming to allocate operating room time. *Interfaces*, Vol 32, No. 2, pp. 63-73.
- Chaabane, S.; Meskens, N.; Guinet, A.; Laurent, M. (2006). Comparison of Two Methods of Operating Theatre Planning: Application in Belgian Hospital. *International Conference on Service Systems and Service Management*, Vol 1, pp. 386-392.
- Santibáñez, P.; Begen, M.; Atkins, D. (2007). Surgical block scheduling in a system of hospitals: An application to resource and wait list management in a British Columbia health authority. *Health Care Management Science*, Vol 10, No. 3, pp. 269-282.
- Beliën, J.; Demeulemeester, E. (2007). Building cyclic master surgery schedules with leveled resulting bed occupancy. *European Journal of Operational Research*, Vol 176, No. 2, pp. 1185-1204.
- Fei, H.; Chu, C.; Meskens, N.; Artiba, A. (2008). Solving surgical cases assignment problem by a branch-and-price approach. *Int J Prod Econ*, Vol 112, No. 1, pp. 96-108.
- Guinet, A.; Chaabane, S. (2003). Operating theatre planning. *International Journal of Production Economics*, Vol 85, No. 1, pp. 69-81.
- Hans, E.; Wullink, G.; van Houdenhoven, M.; Kazemier, G. (2008). Robust surgery loading. *European Journal of Operational Research*, Vol 185, No. 3, pp. 1038-1050.

- Jebali, A.; Hadj Alouane, A.B.; Ladet, P. (2006). Operating rooms scheduling. *International Journal of Production Economics*, Vol 99, No. 1-2, pp. 52-62.
- Marcon, E.; Kharraja, S.; Simonnet, G. (2003). The operating theatre planning by the follow-up of the risk of no realization. *International Journal of Production Economics*, Vol 85, No. 1, pp. 83-90.
- Ogulata, S.N.;Erol, R. (2003). A Hierarchical Multiple Criteria Mathematical Programming Approach for Scheduling General Surgery Operations in Large Hospitals. *Journal of Medical Systems*, Vol 27, No. 3, pp. 259-270.
- Ozkarahan, I. (2000). Allocation of surgeries to operating rooms by goal programing. *Journal of Medical Systems*, Vol 24, No. 6, pp. 339-378.
- Perdomo, V.; Augusto, V.; Xie, X. (2006). Operating Theatre Scheduling Using Lagrangian Relaxation. *International Conference on Service Systems and Service Management*, Vol 2, pp. 1234-1239.
- Pham, D.-.;Klinkert, A. (2008). Surgical case scheduling as a generalized job shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, Vol 185, No. 3, pp. 1011-1025.
- Sier, D.; Tobin, P.; McGurk, C. (1997). Scheduling surgical procedures. *Journal of the Operational Research Society*, Vol 48, No. 9, pp. 884-891.