



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**“Modelos de Programación Matemática para asignación de pabellones quirúrgicos en hospitales públicos”**

MAGÍSTER EN GESTIÓN DE OPERACIONES

PATRICIO ANTONIO WOLFF ROJAS

PROFESOR GUÍA:

Sr. GUILLERMO DURÁN

PROFESOR CO-GUÍA:

Sr. PABLO REY

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

Sr. ÓSCAR BARROS  
Sr. ALFONSO EHIJO

SANTIAGO DE CHILE  
2011

*A mis padres,*

*polola,*

*familia*

*y amigos...*

# Agradecimientos

Me gustaría agradecer a mis padres y familia por todo el apoyo y cariño que se requiere para lograr lo que uno se propone. A mi polola que siempre me escuchó y fue mi cable a tierra en ocasiones en que la academia te aleja de la realidad.

Quiero además hacer un especial agradecimiento a mi amigo Álvaro Fuentes que me ayudó en los momentos difíciles y esas innumerables tranochadas de programación y tazas de café.

Me gustaría agradecer también a mi tía Cecilia que fue una guía y una ayuda en temas que parecían incompresiblemente médicos. A los profesores Guillermo Durán, Pablo Rey y Daniel Espinoza en el desarrollo de esta tesis y al profesor Alfonso Ehijo por sus consejos y recomendaciones. Al profesor Óscar Barros y al equipo de hospitales por los consejos y ayudas incondicionales en el arte de intentar mejorar los hospitales públicos. No puedo olvidarme de agradecer a Julie Lagos, que siempre estuvo del lado de los alumnos y eso se agradece.

Agradezco la colaboración de las personas pertenecientes a las instituciones de salud que participaron en este proyecto, en especial al personal del Hospital Exequiel González Cortés, el Hospital Luis Calvo Mackenna y el Complejo de Salud San Borja Arriarán.

# Índice de Contenidos

<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1	MOTIVACIÓN.....	1
1.2	ANTECEDENTES HISTÓRICOS.....	3
1.3	OBJETIVOS.....	5
1.3.1	<i>Objetivo General</i> .....	5
1.3.2	<i>Objetivos Específicos</i> .....	5
1.4	METODOLOGÍA.....	6
1.5	ESCENARIOS DE COMPARACIÓN ENTRE MODELOS.....	7
1.5.1	<i>Número de pacientes</i> .....	8
1.5.2	<i>Tiempos de duración de intervenciones en función de la duración de la jornada</i> .....	8
1.5.3	<i>Número de Jornadas y/o pabellones disponibles</i> .....	9
1.5.4	<i>Número de Jornadas en las que se pueden programar pacientes</i> .....	9
1.6	INDICADORES DE EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO.....	10
1.6.1	<i>Desempeño computacional</i> .....	10
1.6.2	<i>Calidad del resultado</i> .....	11
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....</b>	<b>15</b>
2.1	CLASIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	16
2.1.1	<i>Campos que permiten la clasificación</i> .....	16
2.1.2	<i>Características de los pacientes</i> .....	17
2.1.3	<i>Medidas de desempeño</i> .....	18
2.1.4	<i>Tipo de Decisión</i> .....	19
2.1.5	<i>Metodología de la investigación</i> .....	21
2.1.6	<i>La incertidumbre</i> .....	22
2.1.7	<i>Aplicación de la investigación</i> .....	22
2.2	CONSIDERACIONES PARTICULARES DEL PROBLEMA.....	24
2.3	PRIORIZACIÓN DE PACIENTES.....	26
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>MÉTODOS DESARROLLADOS.....</b>	<b>28</b>
3.1	MÉTODOS DE SOLUCIÓN PARA EL PRIMER SUBPROBLEMA.....	30
3.1.1	<i>Modelo de programación entera</i> .....	30
3.1.2	<i>Modelo de programación entera con prioridad modificada</i> .....	42
3.1.3	<i>Modelo de programación entera con asignación independiente</i> .....	49
3.1.4	<i>Algoritmo del tipo Backtracking</i> .....	52

3.2	MÉTODO DE SOLUCIÓN PARA EL SEGUNDO SUBPROBLEMA .....	55
<b>CAPÍTULO 4 RESULTADOS.....</b>		<b>58</b>
4.1	PARÁMETROS QUE DEFINEN LOS ESCENARIOS DE ESTUDIO .....	59
4.1.1	<i>Número de pacientes</i> .....	59
4.1.2	<i>Tiempos de duración de intervenciones en función de la duración de la jornada.</i> .....	59
4.1.3	<i>Número de Jornadas y/o pabellones disponibles</i> .....	60
4.1.4	<i>Número de Jornadas en las que se pueden programar pacientes</i> .....	61
4.2	ESCENARIOS DE PRUEBA .....	62
4.3	RESULTADOS OBTENIDOS.....	63
4.3.1	<i>Tiempos de ejecución</i> .....	64
4.3.2	<i>Respeto de la prioridad</i> .....	71
4.3.3	<i>Utilización de Pabellón</i> .....	84
4.4	RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS .....	88
4.4.1	<i>Resultados del algoritmo del tipo Backtracking</i> .....	88
4.4.2	<i>Resultados del modelo de programación entera y su variante</i> .....	89
4.4.3	<i>Resultados del modelo de programación entera con prioridad modificada</i> .....	90
4.4.4	<i>Resultados del modelo de programación entera con asignación independiente</i> .....	91
4.5	RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS CASOS REALES.....	91
<b>CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO .....</b>		<b>95</b>
5.1	CONCLUSIONES .....	95
5.1.1	<i>Conclusiones sobre los resultados del proyecto</i> .....	96
5.1.2	<i>Conclusiones sobre la elección del modelo</i> .....	98
5.2	DIRECTRICES DE TRABAJOS FUTUROS.....	101
5.2.1	<i>Mejora del algoritmo del tipo Backtracking</i> .....	101
5.2.2	<i>Mejora al modelo de programación entera con asignación independiente</i> .....	104
5.3	COMPLEMENTOS AL MODELO.....	106
<b>CAPÍTULO 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>108</b>
<b>CAPÍTULO 7 ANEXOS .....</b>		<b>113</b>
7.1	DETERMINACIÓN DEL VALOR DE $PRI_p$ .....	113
7.1.1	<i>Valores enteros de <math>Pri_p</math></i> .....	115
7.2	ALGORITMO DE BACKTRACKING .....	116
7.3	DATOS UTILIZADOS EN LAS PRUEBAS DE LOS MODELOS .....	117
7.3.1	<i>Datos de los pacientes</i> .....	117
7.3.2	<i>Datos del hospital</i> .....	123
7.4	INDICADORES DE CALIDAD DE LA ASIGNACIÓN.....	127

# Índice de Figuras

Figura 1-1: Presupuestos del Sector Salud en Chile los últimos 10 años.....	4
Figura 2-1: Enfoque de 3 subproblemas de programación de pabellón .....	20
Figura 2-2: Categorización de pacientes .....	26
Figura 3-1: Primera división del Problema Principal .....	28
Figura 3-2: Segunda división del Problema Principal .....	29
Figura 3-3: Modelo de programación entera con prioridad modificada.....	42
Figura 3-4: Modelo de programación entera con asignación independiente.....	49
Figura 3-5: Problema de asignación .....	50
Figura 3-6: Algoritmo del Tipo <i>Backtracking</i> .....	52
Figura 4-1: Tiempos de ejecución del algoritmo del tipo <i>Backtracking</i> para el primer grupo de escenarios.....	65
Figura 4-2: Tiempos de ejecución del algoritmo del tipo <i>Backtracking</i> para el segundo grupo de escenarios.....	65
Figura 4-3: Tiempos de ejecución de modelo de programación entera (MPE) y su variante (MPE 2) para el primer grupo de escenarios .....	67
Figura 4-4: Tiempos de ejecución de modelo de programación entera (MPE) y su variante (MPE 2) para el segundo grupo de escenarios .....	67
Figura 4-5: Tiempos de ejecución de los modelos de programación entera para el primer grupo de escenarios.....	68
Figura 4-6: Tiempos de ejecución de los modelos de programación entera para el segundo grupo de escenarios .....	69
Figura 4-7: Tiempos de ejecución del modelo de programación entera con asignación independiente (MPE AI) para el primer grupo de escenarios .....	70
Figura 4-8: Tiempos de ejecución del modelo de programación entera con asignación independiente (MPE AI) para el segundo grupo de escenarios.....	70
Figura 4-9: Respeto de la prioridad del primer grupo de escenarios para 50 pacientes .....	72

Figura 4-10: Detalle de la asignación de los primeros 29 pacientes del escenario del primer grupo, con 50 pacientes, duraciones de intervenciones promedio del 37,5% y jornadas disponibles de 3,5 .....	73
Figura 4-11: Respeto de la prioridad del primer grupo de escenarios para 100 pacientes .....	74
Figura 4-12: Detalle de la asignación de los primeros 26 pacientes del escenario del primer grupo, con 100 pacientes, duraciones de intervenciones promedio del 50% y jornadas disponibles de 2,5 .....	75
Figura 4-13: Respeto de la prioridad del primer grupo de escenarios para 200 pacientes .....	76
Figura 4-14: Detalle de la asignación de los primeros 21 pacientes del escenario del primer grupo, con 200 pacientes, duraciones de intervenciones promedio del 50% y jornadas disponibles de 3,5 .....	77
Figura 4-15: Respeto de la prioridad del segundo grupo de escenarios para 50 pacientes .....	78
Figura 4-16: Respeto de la prioridad del segundo grupo de escenarios para 100 pacientes .....	78
Figura 4-17: Detalle de la asignación de los primeros 29 pacientes del escenario del segundo grupo, con 100 pacientes, duraciones de intervenciones promedio del 37,5% y jornadas disponibles de 2,5 .....	80
Figura 4-18: Valores obtenidos del Indicador de calidad de la asignación desde el punto de vista de la prioridad para el escenario del segundo grupo, con 100 pacientes, duraciones de intervenciones promedio del 37,5% y jornadas disponibles de 2,5 .....	81
Figura 4-19: Respeto de la prioridad del segundo grupo de escenarios para 200 pacientes .....	82
Figura 4-20: Detalle de la asignación de los primeros 26 pacientes del escenario del segundo grupo, con 200 pacientes, duraciones de intervenciones promedio del 50% y jornadas disponibles de 2,5 .....	83
Figura 4-21: Valores obtenidos del Indicador de calidad de la asignación desde el punto de vista de la prioridad para el escenario del segundo grupo, con 200 pacientes, duraciones de intervenciones promedio del 50% y jornadas disponibles de 2,5 .....	84
Figura 4-22: Utilización de pabellón del primer grupo de escenarios.....	85
Figura 4-23: Utilización de pabellón del segundo grupo de escenarios .....	85
Figura 4-24: Detalle de la utilización de pabellón del primer grupo de escenarios .....	86
Figura 4-25: Detalle de la utilización de pabellón del segundo grupo de escenarios.....	87
Figura 4-26: Problemas del algoritmo del tipo <i>Backtracking</i> .....	88

Figura 5-1: Mejora al algoritmo del tipo <i>Backtracking</i> .....	101
Figura 5-2: Método de Selección 1 .....	103
Figura 5-3: Método de Selección 2 .....	103
Figura 5-4: Mejora al modelo de programación entera con asignación independiente 1 .....	105
Figura 5-5: Mejora al modelo de programación entera con asignación independiente 2 .....	106

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN  
GESTIÓN DE OPERACIONES  
POR: PATRICO WOLFF R.  
FECHA: 25 DE OCTUBRE, 2011  
PROF. GUÍA: Sr. GUILLERMO DURÁN

“MODELOS DE PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA PARA ASIGNACIÓN  
DE PABELLONES QUIRÚRGICOS EN HOSPITALES PÚBLICOS”

La programación de las actividades quirúrgicas en un centro médico es un proceso muy complejo. La elección de los horarios y la asignación de recursos impactan directamente en el número de pacientes tratados y en el nivel de rendimiento del sistema. Las complicaciones de la asignación surgen del gran número de consideraciones que se deben tener cuando se realiza la programación. Un aspecto importante a considerar en la programación de pabellones es la prioridad relativa de los pacientes, la que se basa en criterios de tiempos de espera y categorización biomédica del diagnóstico. El objetivo principal de este proyecto es desarrollar y comparar modelos de optimización que permitan la programación de intervenciones quirúrgicas electivas en pabellones durante intervalos de tiempo específicos.

El proyecto pretende obtener una optimización en el uso del recurso pabellón, reducción de los tiempos de espera de los pacientes y hacer un uso eficiente de los recursos humanos necesarios. En este trabajo se desarrollaron cuatro modelos que permiten la asignación de pacientes a pabellones y horarios específicos: dos de ellos basados en programación matemática entera, uno en algoritmos del tipo *Backtracking* y un modelo mixto. Los modelos desarrollados se estudiaron bajo distintos escenarios, basados en información real de hospitales públicos de Chile.

Los modelos se evaluaron en función del tiempo de ejecución y la calidad del resultado. Para determinar la calidad del resultado, se midió la utilización del recurso pabellón de la solución entregada y el respeto de la prioridad relativa de los pacientes que son asignados. Las pruebas realizadas permiten concluir que la elección del modelo depende fuertemente de las características de los escenarios. En escenarios reales, es posible mediante la utilización de estos modelos obtener mejoras entre un 10% y un 15% del tiempo total comparado con los métodos manuales utilizados actualmente.

# Capítulo 1

## Introducción

A modo de introducción al tema desarrollado en este capítulo se presentan las motivaciones, antecedentes históricos relevantes, los objetivos del proyecto, la metodología empleada, los escenarios que permiten evaluar los resultados, y finalmente, los indicadores de evaluación.

### 1.1 Motivación

El pabellón quirúrgico es un recinto especialmente diseñado y equipado para realizar actividades anestésicas o quirúrgicas. La programación de las actividades quirúrgicas en un centro médico es un proceso muy complejo [25]. La elección de horarios y la disponibilidad

de recursos impactan directamente en el número de pacientes tratados, los tiempos de espera y el nivel de rendimiento del sistema. Las complicaciones de la asignación surgen del gran número de consideraciones que se deben tener cuando se realiza la programación. Algunas de las variables involucradas son: la gran variedad de intervenciones quirúrgicas, las variaciones de las duraciones de las intervenciones, las prioridades de los pacientes, la capacidad del centro médico, la permanencia de los pacientes en hospitalización, los horarios médicos y la edad de los pacientes.

El sistema de salud pública de Chile no es capaz de responder efectivamente a las demandas por atenciones médicas en los distintos niveles de atención (con la excepción de las atenciones de urgencia y de Obstetricia)[16]. En este sector resulta de particular interés generar herramientas de ayuda a la gestión, que pretendan hacer usos eficientes de los recursos e instalaciones. En los últimos 60 años se han desarrollado un gran número de investigaciones con el fin de mejorar la eficiencia de los hospitales [10].

El objetivo principal de la tesis es proponer una herramienta computacional de gestión de pabellones quirúrgicos en un hospital público. Con esto se pretende obtener una optimización en el uso del recurso pabellón, conseguir una reducción de tiempos de espera, hacer un uso eficiente de los recursos humanos necesarios y lograr una reducción de costos.

Si bien, al modelo desarrollado en este proyecto fue pensado para un hospital público en particular, el proceso de asignación de pabellones quirúrgicos en un hospital no debería diferir demasiado de otro, por lo que se pueden extender los alcances [2].

Como consecuencia indirecta del uso de una sistematización y las definiciones asociadas a ésta, aumentará la transparencia y la equidad en la asignación de los recursos [25]. Para el desarrollo del proyecto se debe definir, en conjunto con los hospitales, las reglas de priorización y calendarización que serán utilizadas en cada paciente, lo que beneficiará la transparencia en las decisiones.

## 1.2 Antecedentes Históricos

A continuación se presentan algunos hitos importantes en el sector salud.<sup>i</sup> La Facultad de Medicina de la Universidad de Chile se funda en 1842 comenzando el desarrollo de la medicina en Chile, a través del estudio de las enfermedades endémicas existentes y el mejoramiento de la higiene pública y doméstica. En 1924 se crea el Ministerio de Higiene, Asistencia y Previsión Social. Junto con esto, se organiza la Caja de Seguro Obrero para cubrir los riesgos de enfermedad, invalidez, vejez y muerte.

El Servicio Médico Nacional de Empleados (Sermena) y el Sistema Nacional de Salud (SNS) se fusionan en 1979, con lo cual se reorganiza el Ministerio de Salud. Se crea el Fondo Nacional de Salud (Fonasa), los Servicios de Salud, la Central Nacional de Abastecimiento (Cenabast) y el Instituto de Salud Pública (ISP).

En 1981 se crean las Instituciones de Salud Previsional (Isapres), entidades privadas con sistemas de libre elección que otorga prestaciones y beneficios de salud a sus afiliados. En 2005 entra en vigencia la nueva Ley de Autoridad Sanitaria y la Ley de Garantías Explícitas en Salud (AUGE).

En la actualidad la Red Asistencial del Sector Salud en Chile cuenta con un total de 183 hospitales, de los cuales 59 son de Alta Complejidad, 24 de Mediana Complejidad y 100 de baja Complejidad<sup>ii</sup>. El total de camas de la red para el año 2010 es de 26.372.

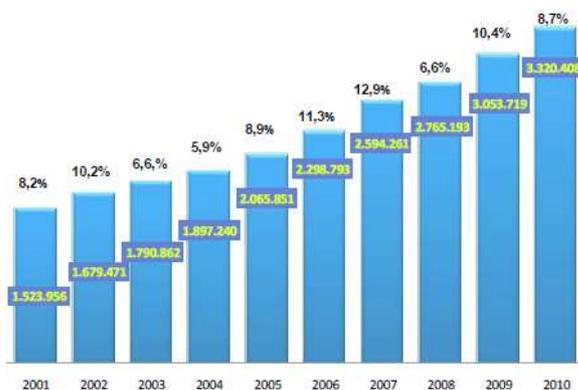
El presupuesto en salud ha crecido en promedio en un 10% anual en los últimos 10 años. En los últimos cinco años el crecimiento del presupuesto en salud ha sido de un 44%. A

---

<sup>i</sup> Información proveniente de la Página Web del Ministerio de Salud, <http://www.redsalud.gov.cl>, 2010 y documento acerca del Sistema de Salud Chileno en Página Web del Colegio Médico de Chile <http://www.colegiomedico.cl/Portals/0/files/biblioteca/documentos/otros/Sistemasaludchileno.pdf>, 2010.

<sup>ii</sup> Artículo 43 y 44 del Reglamento Orgánico de los Servicios de Salud, contenido en el decreto supremo N° 42 de 3 de febrero de 1986 del Ministerio de Salud- Chile.

continuación se muestra un gráfico del presupuesto de los últimos 10 años en el sector salud pública de Chile<sup>iii</sup>:



**Figura 1-1: Presupuestos del Sector Salud en Chile los últimos 10 años**

Pese a la importante inversión en el sistema público de salud y el mejoramiento de las condiciones salariales de los trabajadores del sector, persisten importantes problemas. Éstos están referidos tanto a equidad en el acceso de la población a la salud y en las coberturas de las prestaciones, como a la eficiencia en gestión administrativa, en el uso y rendimiento de los recursos.

---

<sup>iii</sup> Información proveniente de la Página Web del Ministerio de Salud, <http://www.redsalud.gov.cl> , 2010

## 1.3 Objetivos

En esta sección se encuentran los objetivos principales y específicos que pretenden ser cubiertos en el proyecto.

### 1.3.1 *Objetivo General*

El objetivo principal del proyecto es desarrollar y comparar modelos de optimización que permitan la programación de intervenciones quirúrgicas electivas en pabellones durante intervalos de tiempo específicos (generación de tablas quirúrgicas). Con esto se pretende obtener una optimización en el uso de los recursos, conseguir una reducción de tiempos de espera, hacer uso eficiente de los recursos humanos necesarios y lograr una reducción de costos.

### 1.3.2 *Objetivos Específicos*

A continuación se presentan los objetivos específicos de este proyecto de tesis:

1. Desarrollar un modelo de programación entera que permita la asignación de pabellones quirúrgicos.
2. Evaluar el desempeño del modelo de programación entera bajo distintos escenarios.
3. Desarrollar un algoritmo computacional que permita la asignación de pabellones quirúrgicos.
4. Evaluar el desempeño del algoritmo computacional del tipo *Backtracking* bajo distintos escenarios.
5. Comparar el desempeño del modelo de programación entera y el algoritmo computacional del tipo *Backtracking* desarrollado.

## 1.4 Metodología

La metodología utilizada para esta tesis se resume en las siguientes actividades:

1. Investigar el funcionamiento de los pabellones quirúrgicos en hospitales públicos y definir el problema que se pretende solucionar. Para esto se debe:
  - Describir en detalle cuál es el problema general que enfrentan los hospitales públicos a la hora de programar pabellones quirúrgicos.
  - Especificar cuáles son los actuales objetivos, requerimientos y restricciones para poder resolver el problema.
  
2. Desarrollar un modelo de programación entera que permita la asignación de pabellones quirúrgicos utilizando técnicas de modelamiento matemático. Para esto se debe realizar las siguientes actividades:
  - Plantear un modelo de programación entera con los objetivos y restricciones identificadas.
  - Definir los valores de los parámetros del modelo planteado.
  - Resolver el modelo planteado.
  - Realizar un análisis para determinar cuáles son los parámetros críticos del modelo desarrollado.
  - Estudiar la capacidad del modelo para resolver el problema ante distintas instancias y alternativas de decisión.
  - Analizar la calidad de la solución entregada
  - Buscar enfoques alternativos de modelamiento al problema.
  
3. Desarrollar un algoritmo computacional del tipo *Backtracking* que permita la asignación de pabellones quirúrgicos que resuelva el mismo problema resuelto con el

modelo de programación entera. Las actividades que se deben realizar en este punto son las siguientes:

- Diseñar y construir un algoritmo.
  - Definir los valores de los parámetros del algoritmo.
  - Ejecutar el algoritmo desarrollado.
  - Realizar un análisis para determinar cuáles son los parámetros críticos del algoritmo.
  - Estudiar la capacidad del algoritmo para resolver el problema ante distintas instancias y alternativas de decisión.
  - Analizar la calidad de la solución entregada.
  - Buscar modificaciones en el algoritmo, para mejorar su desempeño.
4. Especificar escenarios reales de programación de pabellones.
  5. Definir variaciones en los escenarios reales que permitan evaluar el comportamiento del modelo y del algoritmo desarrollado.
  6. Comparar el desempeño del modelo de programación entera y el algoritmo computacional de tipo *Backtracking* desarrollado.

## 1.5 Escenarios de comparación entre modelos

Los modelos desarrollados poseen características propias que los distinguen y a la vez, les permiten tener diferentes desempeños frente a diferentes escenarios. La clasificación de los escenarios es bastante difícil en este caso, ya que la programación de los pabellones está sujeta a un gran número de condiciones que se deben cumplir simultáneamente.

A continuación se presenta una clasificación de 4 parámetros que permiten determinar los escenarios para evaluar los resultados entre los distintos modelos.

### ***1.5.1 Número de pacientes***

La primera variación que se puede realizar entre los distintos escenarios es el número de pacientes que se pretende programar. Algunos modelos son muy sensibles al número de pacientes que ingresan al sistema y en otros casos puede no ser relevante el número de pacientes.

Una consideración importante con respecto al número de pacientes, deriva de la motivación del proyecto y tiene que ver con las listas de espera. Los modelos deben poder servir para casos en los cuales el número de pacientes no alcanza a cubrir el total de horas disponibles para la programación. Para estos casos los modelos y algoritmos deben ser capaces de agrupar a los pacientes los primeros días del intervalo de programación. Sin embargo, los modelos desarrollados fueron pensados para mejorar el desempeño de la programación en casos reales, en los cuales la demanda es mayor que la oferta de pabellones.

### ***1.5.2 Tiempos de duración de intervenciones en función de la duración de la jornada.***

El tiempo de duración de las intervenciones quirúrgicas depende fuertemente de la complejidad de éstas. En este sentido, algunas especialidades médicas se caracterizan por tener duraciones de intervenciones más largas que otras. Por este motivo, es importante evaluar diferentes escenarios donde varíe el promedio de duración de las intervenciones quirúrgicas. Las duraciones de las intervenciones y las duraciones de las jornadas se evaluaron dentro de intervalos de duraciones reales, donde la información que fue utilizada se obtuvo de los registros de los hospitales en los cuales se diseñó el proyecto.

### ***1.5.3 Número de Jornadas y/o pabellones disponibles***

Un paciente puede ser programado a priori en más de una jornada (para que el problema tenga sentido). El número de jornadas que efectivamente podría ser programada para cada paciente depende de varios factores, principalmente destacan:

- 1) La complejidad del paciente.
- 2) Si los médicos son pre-asignados.
- 3) El número de médicos disponibles en cada jornada.
- 4) El conocimiento de los médicos disponibles en cada jornada.
- 5) Especialización de los pabellones

Para simplificar el análisis de los escenarios, la forma en la cual influyen estas características en el número de jornadas o pabellones disponibles, fue resumida en el promedio de número de jornadas disponibles por paciente.

### ***1.5.4 Número de Jornadas en las que se pueden programar pacientes***

El número de jornadas en las que se pueden programar pacientes es un valor determinado por diversos factores. En algunos casos este número depende de la preasignación de horas de pabellón a las especialidades médicas y en otros casos de los recursos con que esta cuenta.

Este número depende de varios factores entre los que destacan:

- 1) El número de médicos disponibles en cada jornada.
- 2) El número de anestesiólogos disponibles en cada jornada.
- 3) Número de pabellones.
- 4) Especialización de los pabellones.
- 5) Número de jornadas de trabajo asignadas a la especialidad médica.

## **1.6 Indicadores de evaluación de desempeño**

El desempeño de cada modelo puede ser evaluado en distintos escenarios y puede ser evaluado según la calidad de la solución entregada. El desempeño de los modelos puede ser clasificado en dos categorías. La primera, es el desempeño computacional donde destaca el tiempo de ejecución del modelo. La segunda categoría de desempeño, tiene que ver con características propias del problema. Es decir, el porcentaje de utilización del pabellón logrado con cada uno de los modelos y el respeto de la prioridad de los pacientes en las asignaciones de estos.

### ***1.6.1 Desempeño computacional***

Como ya se introdujo anteriormente, el desempeño de un modelo puede ser evaluado según sus características computacionales. Este desempeño es muy relevante desde el punto de vista de la implementación, ya que debe cumplir con requisitos específicos para entregar soluciones factibles de ser implementadas en un caso real.

#### **1.6.1.1 Tiempo de Ejecución**

Una implementación rutinaria de un sistema que incluya un modelo de gestión de pabellones como el que se desarrolló en este proyecto de tesis, debe poder resolver el problema en menos de un tiempo límite. Este tiempo depende fuertemente del instante en que se ejecuta el modelo. Para el caso de la cirugía electiva en los hospitales, las programaciones de pabellón se realizan en reuniones de médicos cirujanos, prácticamente todas las semanas los días viernes en la tarde o lunes en la mañana. Programaciones de más de una semana no son habituales en los hospitales. Esto es debido a que al programar con mucha anticipación no es posible saber el estado en que se encontrarán los pacientes programados al final de periodo, cuando a éstos les corresponda ser operados. Si se considera que la ejecución del modelo ocurrirá en una reunión de médicos cirujanos, ésta no podría tardar más de 10 ó 15 minutos.

En algunos hospitales la programación se realiza día a día, para estos casos la programación es tan simple que no necesita de un modelo de programación. Estos casos no son considerados por su simpleza y porque desde el punto de vista operativo podría no ser una buena práctica.

### **1.6.2 Calidad del resultado**

La motivación principal del proyecto es obtener por medio de un modelo o un algoritmo, una optimización en el uso del recurso pabellón. En este sentido, se propone el porcentaje de utilización como una medida de la calidad del resultado. Por otro lado, está el respeto de la prioridad de los pacientes, ya que como se sabe, no todos los diagnósticos permiten los mismos tiempos espera y las llegadas de los pacientes no son simultáneas.

#### **1.6.2.1 Porcentaje de utilización de pabellón**

El incremento en el porcentaje de utilización de pabellón es parte de la motivación del proyecto, ya que permitirá mejorar la calidad del resultado, desde el punto de vista económico del hospital. Esta eficiencia en la utilización de pabellón proviene de mejorar la forma en la cual se toman las decisiones, apoyándolas con métodos analíticos.

Según el Ministerio de Salud de Chile<sup>iv</sup> el Porcentaje de utilización proviene de:

$$\text{Porcentaje de Utilización} = \frac{h_o + h_p}{h_D} \cdot 100\% \quad (1.1)$$

donde  $h_o$  son las Horas Mensuales Ocupadas Totales,  $h_p$  las Horas Mensuales de Preparación y  $h_D$  representa el Total de Horas Mensuales Disponibles.

---

<sup>iv</sup> Manual de Instrucciones REM-2010 - Serie B, Ministerio de Salud de Chile, 2010.

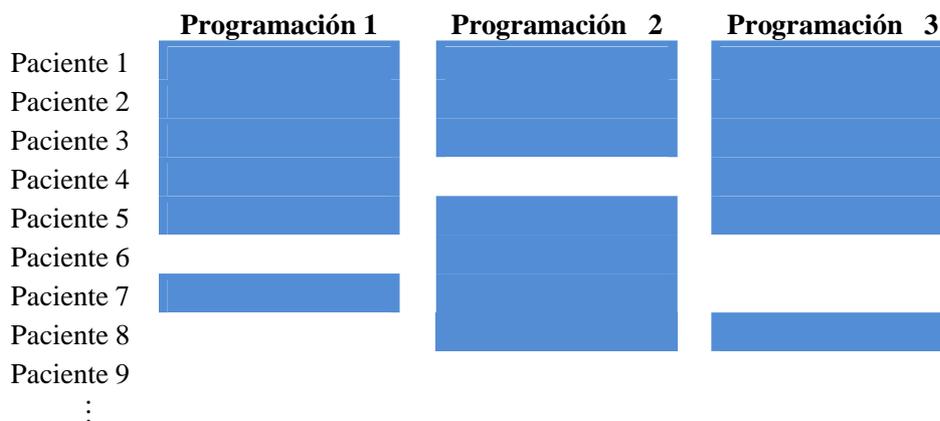
Las Horas Mensuales Ocupadas Totales representan las horas efectivamente ocupadas para la totalidad de las intervenciones quirúrgicas realizadas en los pabellones del establecimiento. Las Horas Mensuales de Preparación registrarán las horas mensuales utilizadas en la mantención y desinfección del pabellón.

El Total de Horas Mensuales Disponibles representa el total de horas mensuales que los pabellones se encuentran en condiciones de uso para realizar cirugía mayor. En pabellones destinados a intervenciones quirúrgicas electivas, corresponde estar disponibles a lo menos ocho horas diarias.

### 1.6.2.2 Respeto de la prioridad

Al existir una prioridad específica para cada paciente en la lista de espera, establecida previamente a la ejecución del modelo o el algoritmo, se debe respetar esta lista en la asignación.

Para esto, se presenta el siguiente ejemplo, donde se comparan 3 programaciones, utilizando el mismo escenario, se prueba para 9 pacientes ordenados por prioridad. En la siguiente tabla, se muestra para cada paciente el resultado de la programación (si se pinta, es que ese paciente fue asignado).



**Figura 1-1: Comparación de asignaciones entre programaciones**

Se observa que la programación 1 es la que mejor respeta la prioridad al asignar pacientes más prioritarios que las otras. La programación 2 entregó una asignación que no respeta de mejor manera la prioridad de los pacientes. Si bien, la programación 2 agregó más pacientes, no asignó al paciente 4, que es más prioritario que los pacientes 6 y 8. La programación 3 entregó una asignación que contiene más pacientes que las otras, pero en lugar de agregar al paciente 7 agrega al paciente 8.

Una perspectiva para medir el respeto de la prioridad es observar el primer paciente no asignado. En este caso esta perspectiva no sirve, ya que el primer paciente no asignado de las programaciones 1 y 3 son el mismo, pero el resultado de la programación 1 es mejor a la de la programación 3. Otra perspectiva, es sumar los NAWD o Tiempo de espera necesario ajustado<sup>v</sup> de cada paciente, pero este resultado podría hacer incluso que la suma de los NAWD de los pacientes de la programación 2 sea mayor que la de la programación 1 (ver sección 2.3).

Finalmente, una opción es utilizar la suma de los valores de los  $PRI_p$  (ver Anexo 7.1) de cada programación. Sin embargo, por los valores que toman los  $PRI_p$ , las soluciones de cada programación pueden ser de órdenes de magnitud muy diferentes entre sí, en especial si el número de pacientes analizados es muy elevado.

Para poder comparar estas programaciones, se puede obtener el logaritmo de la suma de los  $PRI_p$  de los pacientes asignados en la programación. A este término se le denominó Indicador de calidad de la asignación desde el punto de vista de la prioridad y se calcula de la siguiente forma:

$$IC_A = \log_{10} \sum_{P \in A} PRI_p \quad (1.2)$$

---

<sup>v</sup> Del inglés *Need Adjusted Waiting Day*

donde A es el conjunto de pacientes asignados por cada programación. Este valor representa la calidad de cada programación en función de la solución que se obtiene de todos los modelos y permite comparar los resultados de los modelos en un mismo escenario.

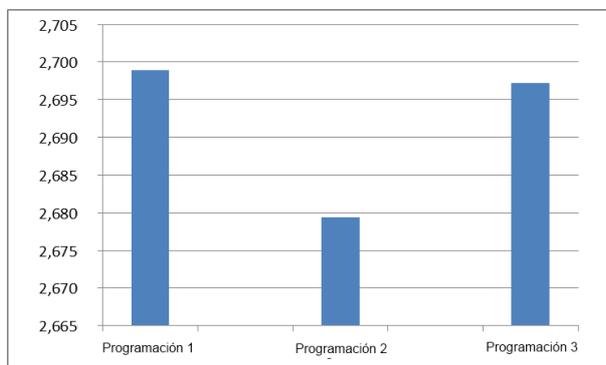
Para el ejemplo anterior, si se utiliza el  $IC_A$  para comparar las asignaciones se tiene:

Paciente	PriP	Programación 1	Programación 2	Programación 3
1	256	256	256	256
2	128	128	128	128
3	64	64	64	64
4	32	32		32
5	16	16	16	16
6	8		8	
7	4	4	4	
8	2		2	2
9	1			

$\sum_{P \in A} PRI_P$	=	500	478	498
$\log_{10} \sum_{P \in A} PRI_P$	=	2,698970	2,679428	2,697229

Aquí se observa que pequeñas diferencias en el indicador reflejan importantes variaciones en la calidad de las asignaciones desde el punto de vista de la prioridad. El anterior resultado se puede graficar para hacer más evidente la diferencia entre los valores obtenidos de los Indicadores de calidad de la asignación desde el punto de vista de la prioridad.



**Gráfico 1-2: Ejemplo de comparativa de programaciones en función del respeto de la prioridad**

## **Capítulo 2**

### **Descripción del Problema**

Cuando se habla de gestión de pabellones y optimización de recursos de pabellón se está hablando de cómo se asignan los recursos del hospital a los pacientes que serán intervenidos quirúrgicamente. A esta programación se le denomina tabla quirúrgica y contiene la planificación de los recursos y el orden de intervención de los pacientes. En esta descripción del problema, se presenta una clasificación que contempla una revisión de la bibliografía asociada y una descripción particular del problema. Por la importancia que tiene en el desarrollo de la tesis, también se presenta el método que es considerado para determinar la prioridad.

## 2.1 Clasificación del problema

Existe un gran número de investigaciones científicas en lo que refiere a programación de pabellones quirúrgicos. Una revisión bibliográfica divide los desarrollos relacionados específicamente a programación de pabellones en base a 6 campos [10]. Estos campos son explicados a continuación y en la siguiente sección, se utilizan para clasificar el problema resuelto en esta tesis.

### 2.1.1 Campos que permiten la clasificación

A continuación se enumeran y detallan los campos que permiten la clasificación de las investigaciones relacionadas con programación de pabellones y se analiza la literatura existente al respecto, comparándola con este desarrollo:

1. **Características de los pacientes:** Los pacientes que ingresan a pabellón tienen distintas características y condiciones. El diagnóstico y los agravantes asociados determinan en qué momento se deben realizar la intervención quirúrgica. Algunos pacientes, luego del diagnóstico, pueden ser tratados después de un tiempo de espera, debido a que su condición no es tan grave (pacientes electivos) y otros deben quedarse en el hospital (a éstos se les denomina pacientes no electivos). Dentro de los pacientes electivos se diferencian entre los que deben ser hospitalizados (internos) o los que tienen intervenciones que no requieren hospitalización (externos). Dentro de los pacientes no electivos se clasifican entre los que deben ingresar inmediatamente al pabellón (emergencias) o los que pueden ser hospitalizados o estabilizados en el hospital un tiempo determinado (urgencias).

2. **Medidas de desempeño:** Se clasifican según criterios de desempeño, tales como el tiempo de espera, el volumen de pacientes, la utilización, el tiempo total utilizado, la disminución de pacientes cancelados, valor financiero u otras características de los pacientes.

3. **Tipo de Decisión:** En esta parte se clasifican según el tipo de decisión que se toma (fecha, hora, lugar o capacidad) y a qué nivel (si se aplica a una especialidad médica, un cirujano o un paciente).

4. **Metodología de la investigación:** Aquí se clasifican según el tipo de análisis y según la técnica de solución empleada.

5. **La incertidumbre:** Se diferencian los que incorporan incertidumbre en la llegada o tiempo de duración, de los que utilizan información determinística.

6. **Aplicación de la investigación:** Se clasifica según el origen de los datos de las pruebas y su aplicación en la práctica.

### ***2.1.2 Características de los pacientes***

Aquí se clasifican los estudios en función de los pacientes, los que pueden ser electivos y no electivos. La primera clase representa desarrollos en los que las cirugías pueden estar bien planificadas y con anticipación. En la segunda clase, los pacientes llegan de forma espontánea y la planificación incorpora incertidumbre. Dentro de los pacientes electivos se diferencian entre hospitalizados y ambulatorios. En el caso de los pacientes no electivos se clasifican entre urgencias o emergencias.

Existe un gran número de investigación científica en el caso de los pacientes electivos, debido a las ventajas que se obtienen de la programación. Aunque muchos autores no indican qué tipo de pacientes electivos están considerando, algunos distinguen entre los pacientes hospitalizados y ambulatorios.

Algunos estudios de programación de pabellones quirúrgicos [13][21] hacen hincapié si el paciente es ambulatorio u hospitalizado para considerarlos en el modelo. En esta tesis se

analizan pacientes electivos y se consideran pacientes ambulatorios y hospitalizados. Desde el punto de vista de la programación de pabellones, en los hospitales estudiados no existían grandes consideraciones al respecto.

Una consideración que fue observada en los hospitales donde se realizó el proyecto, tiene que ver con la complejidad de las intervenciones que requieren hospitalización. Estas intervenciones se realizan preferentemente en la mañana y las intervenciones ambulatorias en la tarde. Sin embargo, en algunos casos se prefiere operar a algún ambulatorio en la mañana, ya que esto permite liberar una cama a la tarde y poder realizar una segunda intervención sin ocupar una cama adicional. En otro hospital, todos los pacientes son considerados como hospitalizados, pero las altas tardan menos en darse para pacientes con intervenciones ambulatorias.

Pham y Klinkert [21] plantean la diferencia entre pacientes hospitalizados y ambulatorios, basados incluso en el origen físico de los mismos. En los hospitales estudiados en esta tesis, ambos tipos de pacientes son llevados a pabellón desde el mismo lugar.

### ***2.1.3 Medidas de desempeño***

Las medidas de desempeño de los modelos y algoritmos desarrollados pueden ser determinadas según la disminución de los tiempos de espera de los pacientes, la utilización de los pabellones, la disminución en tiempos de programación, la disminución de pacientes cancelados o el costo financiero total.

Las listas de espera son una problemática que afecta a los hospitales, especialmente en el sector público. La utilización de los pabellones es de particular interés debido a los costos de los recursos utilizados. El manejo de las listas de espera y la programación de pabellones, sin duda han motivado el desarrollo de técnicas de investigación de operaciones en esa dirección.

En este estudio se enfrenta el problema de asignación de pabellones con la finalidad de mejorar la utilización de los mismos y disminuir el tiempo de espera de los pacientes por una intervención quirúrgica. Es importante mencionar que la disminución del tiempo de espera de los pacientes está relacionada con la prioridad que este paciente tenga en relación al resto. Esto es debido a que la prioridad es construida en función de la urgencia de la intervención y el tiempo de espera entre el diagnóstico y la programación, considerando que la prioridad relativa aumenta para pacientes con tiempos de espera mayores. El modelo considera también otras características especiales de los pacientes, como la preasignación de un determinado médico a un determinado paciente.

Existen muchos estudios [1][13][19][27] referidos a la forma en la cual se deben priorizar los pacientes. En esta tesis se utiliza una técnica de priorización de pacientes que se ajusta a la información que está disponible para el hospital y a las reglas de priorización definidos por los médicos del hospital. Testi et al. [27] muestran los resultados de un estudio realizado por especialistas de la Universidad de Génova y del Hospital Villa Scassi en Génova, Italia y plantea una forma en la cual los pacientes pueden ser priorizados de manera explícita y transparente. En esta tesis se utilizan algunas de las técnicas descritas en ese trabajo y que son detalladas en la sección 2.3.

#### ***2.1.4 Tipo de Decisión***

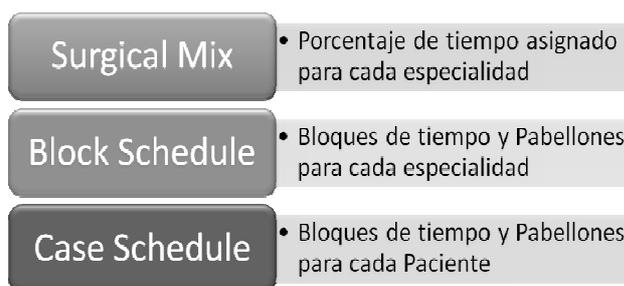
Para poder clasificar un estudio, es importante saber qué tipo de decisión se toma, ésta puede ser: fecha, donde se determina un día específico; hora, donde se designa una hora específica; lugar, donde se puede determinar un pabellón específico; y capacidad, cuando se asigna una determinada capacidad a un paciente, equipo médico o especialidad (ej.: 6 horas de pabellón a la especialidad de urología).

Al mismo tiempo, las investigaciones científicas se pueden clasificar según el nivel en que se toman las decisiones. Éstas pueden ser: una especialidad médica, un cirujano o un paciente en particular.

En esta tesis, al igual que en otros estudios [9][17][24][26] se toma la decisión sobre cada paciente y se asigna: fecha, hora y pabellón.

En algunos casos la estrategia para enfrentar este problema de la programación de pabellones es: primero, definir qué especialidades y grupos quirúrgicos operarán y en qué pabellones.

Algunos autores proponen dividir el problema de la asignación de pabellones en 3 subproblemas [3][4][5][7][15][26]. Estos problemas deben ser resueltos en orden secuencial, aunque en algunos hospitales públicos de Chile se utiliza la información histórica para elaborar una solución acordada de los dos primeros subproblemas.



**Figura 2-1: Enfoque de 3 subproblemas de programación de pabellón**

El primer subproblema corresponde a determinar qué porcentaje del tiempo se debe asignar a cada especialidad. Esto corresponde a un problema típico en los hospitales con un número fijo de pabellones quirúrgicos. Existen iniciativas para determinar un método equitativo de distribución de tiempo a las especialidades como las mostradas en el estudio de Beliën y Demeulemeester [4].

El segundo subproblema, corresponde a determinar qué bloques de tiempo y qué pabellones deben ser asignados a cada especialidad médica. En algunos casos, como en el de Jebali et al. [17] y Hughes y Soliman [15] para resolver esto se proponen modelos de programación entera para resolver el problema de asignación. En otros casos, como el

propuesto por Santibáñez et al. [25] se propone utilizar datos históricos para fijar los bloques horarios. Esta asignación de bloques horarios y pabellones a determinadas especialidades se realiza por el jefe de pabellones o por acuerdos entre jefes de especialidades del hospital, en función de una serie de consideraciones, donde destaca:

- Número de médicos disponibles de una especialidad en una jornada.
- Compatibilidad entre la especialidad médica y las características del pabellón.
- Número de anestesiólogos, arsenaleras, enfermeras y equipos disponibles.
- Respetar los porcentajes del tiempo asignados a cada especialidad.

El tercer subproblema es el que se aborda en este proyecto y corresponde a la asignación de pacientes a los bloques horarios y pabellones. Para este proyecto se propone un horario fijo que es construido por el jefe de pabellón en acuerdo con los jefes de las especialidades y donde la asignación se basa en los horarios de trabajo de los médicos que realizan las intervenciones y las capacidades de los distintos pabellones. Es decir, no se integra la planificación de las salas operatorias con la construcción de la tabla operatoria.

### ***2.1.5 Metodología de la investigación***

Aquí, se clasifican según el tipo de análisis o técnicas de evaluación que se aplican a la configuración del problema, como la programación matemática, simulación o procedimientos analíticos que se realizan en la investigación. Muchas técnicas pueden ser utilizadas en un mismo estudio para un mismo caso.

También se puede clasificar un estudio de programación de pabellones según la técnica de solución empleada. Ésta puede ser mediante programación matemática, simulación o el desarrollo y aplicación de alguna Heurística u otro método computacional.

El enfoque de esta tesis es de optimización multicriterio. En esta tesis, al igual que en algunos estudios de programación de pabellones como los de Cardoen et al. [8][9] se aplican

múltiples enfoques (como generación de columnas, *Branch-and-Price*, *Branch-and-Bound*) para resolver el problema de optimización exacta multicriterio. En algunos casos [17][18][21][22], el problema multicriterio es resuelto considerando costos asociados a cada criterio. En estos casos, la función objetivo minimiza la sumatoria de los costos de todos los criterios. Otra perspectiva [28], es considerar una penalidad asociada a cada criterio. En este caso, la función objetivo minimiza la sumatoria de las penalidades asociadas a cada uno.

### **2.1.6 La incertidumbre**

En el ámbito de la salud, uno de los problemas más frecuentes es la variabilidad e incertidumbre inherente a los servicios quirúrgicos.

Algunos estudios consideran los tiempos de llegada de los pacientes como variables estocásticas. En este caso, las cirugías son electivas, por lo que no se consideran las urgencias en la programación. Es decir, las llegadas de los pacientes no son espontáneas, sino que son programadas con anticipación.

En este caso, no se considera la variabilidad en el largo de las intervenciones, debido a que no existe información a ese nivel de detalle de los pacientes y de las intervenciones quirúrgicas. Sin embargo, enfoques como el de algunos estudios [14][19], podrían ser fácilmente incorporados a los modelos aquí desarrollados. En estos estudios se considera la variabilidad en el largo de las intervenciones y se planifican tiempos muertos o de holgura sobre la suma de los tiempos promedios de duración de las intervenciones.

### **2.1.7 Aplicación de la investigación**

Producto de la implementación de tecnologías de información, muchas investigaciones cuentan con datos disponibles para la implementación de estrategias de gestión de operaciones. Esto ha permitido que las investigaciones puedan contar con pruebas y datos reales. Que las pruebas puedan ser realizadas con datos reales no implica que los resultados de

la investigación vayan a ser llevados a la práctica o ser utilizados de forma rutinaria.

En este proyecto de tesis se contó con el apoyo de 3 hospitales públicos en Chile y algunas otras organizaciones relacionadas con la salud pública chilena, que garantizaron el acceso a datos que permitieron modelar y definir el problema particular de la gestión de pabellones en hospitales públicos en Chile. Estos 3 hospitales son el Hospital Exequiel González Cortés, el Hospital Luis Calvo Mackenna y el Complejo de Salud San Borja Arriarán.

Este proyecto es parte de una investigación que pretende acercar técnicas de gestión de operaciones y arquitecturas de negocios al sector de la salud pública. La investigación se centra en la introducción de prácticas modernas de gestión, sobre la base de un enfoque de procesos. En el proyecto se propone definir explícitamente los procesos clave de un hospital, diseñar estos procesos introduciendo las mejores prácticas conocidas, como el uso de técnicas analíticas como *Business Intelligence* y modelos de optimización y establecer los apoyos computacionales utilizando tecnología de última generación. En este sentido, el estudio tiene el objetivo de desarrollar una herramienta que cumpla con las especificaciones definidas por quienes conocen el problema de cerca, pero además cuenta con una importante perspectiva de poder ser aplicada de forma rutinaria en un hospital.

## 2.2 Consideraciones particulares del problema

A continuación se presentan las consideraciones del problema que fueron contempladas para el proyecto:

1. Un paciente no puede ser operado dos veces en un mismo periodo de programación.
2. Se cuenta con una lista priorizada de pacientes/diagnósticos que serán operados por especialidad. Esta prioridad está definida como se describe en la sección 2.3. Sin embargo, lo relevante es cómo esta prioridad influye en los modelos. Esto se detalla en la sección 3.1.1.4.1.
3. Se respeta una prioridad que considera factores médicos y de tiempo de espera. Sin embargo, podrían no incluirse en la programación pacientes, que debido a sus características, no puedan ser asignados en una semana.
4. Los pacientes con prioridad más alta se asignan preferentemente al principio de la semana.
5. Se conocen los días en los cuales los pacientes pueden ser operados dentro del periodo de programación. Es decir, los pacientes no necesariamente pueden ser operados cuando las condiciones por parte del hospital están dadas.
6. Se consideran pacientes “especiales”. Esta condición es determinada en caso que el paciente tenga otra complicación (ej.: alergia al látex, menor de un año) que requiera que sólo se pueda programar su intervención quirúrgica a primera hora del día.
7. El hospital cuenta con información detallada de la disponibilidad horaria de su personal.

8. Se debe intentar repartir de forma equitativa la carga de trabajo de los médicos cada semana. Esta repartición se debe hacer proporcional a un porcentaje de horas definidas por el hospital. En esta tesis se utilizará una simplificación de este porcentaje de horas y que corresponde a utilizar las horas contratadas de cada médico.
9. Los médicos son especialistas en operar algunas intervenciones.
10. Los pabellones quirúrgicos son diferentes entre sí y están especializados en algunas clases de intervenciones.
11. La programación de pabellones es por especialidad. Es decir, una especialidad en una misma jornada puede tener uno, más de uno o ningún pabellón. En los hospitales estudiados, ninguna especialidad tuvo, en el intervalo de estudio, más de 2 pabellones asignados simultáneamente.
12. Las intervenciones quirúrgicas requieren de dos médicos. En el caso de ser especificado un médico para un paciente, se deben buscar turnos en los cuales el médico especificado esté acompañado por un segundo médico.
13. Los horarios de atención son de lunes a viernes de 8:00 a 13:00 hrs. en la jornada de la mañana y de 14:00 a 17:00 hrs. en la jornada de la tarde.
14. Se permiten sobrepasos en los horarios determinados por el hospital, para la programación de pabellones quirúrgicos. Estos sobrepasos permiten mejorar la eficiencia, pero requieren de un compromiso por parte del hospital que garantice cubrir los costos extras de esta consideración.
15. Se deben tener en cuenta consideraciones que apuntan a que no exista duplicación de médicos, pabellones o anestesistas. Que se respeten las horas de los días, tiempos de almuerzo, etc.

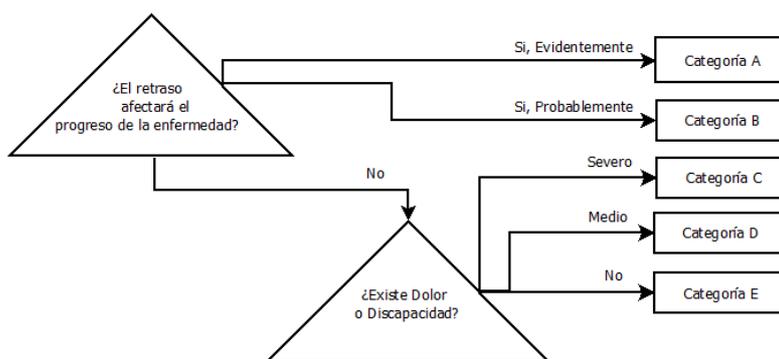
## 2.3 Priorización de pacientes

Un método importante de priorización de pacientes en lista de espera de cirugía electiva se basa en los resultados de un estudio realizado por la Universidad de Génova y del Hospital Villa Scassi de Génova, Italia. El estudio [27], sugiere 5 tipos de urgencias a las cuales se asocia un tiempo máximo de espera recomendado, el cual va de un rango de una semana a un año, tal y como se muestra en la tabla a continuación:

Categoría	Tiempo de Espera
<b>A</b>	1 Semana
<b>B</b>	1 Mes
<b>C</b>	3 Meses
<b>D</b>	6 Meses
<b>E</b>	1 Año

**Tabla 2-1: Clasificación de Categorías**

Para determinar la categoría de cada paciente se considera el diagnóstico y una serie de agravantes médicos asociados al paciente. Esta categoría es determinada clínicamente en función de 3 criterios: *progreso de la enfermedad*, *el dolor* y *la discapacidad*. Para esto, los médicos se basan en el siguiente árbol de decisión



**Figura 2-2: Categorización de pacientes**

Con esto se observa que los pacientes con diferentes enfermedades pueden ser incluidos en la misma categoría y pacientes con la misma enfermedad pueden tener categorías diferentes.

Hasta ahora, el criterio explicado anteriormente sólo permite clasificar pacientes. No obstante, la prioridad tiene que ver con la posición relativa de pacientes en una lista. Una perspectiva es realizar varias listas de pacientes por categoría. Sin embargo, desde el punto de vista de la programación de pabellones, es fundamental contar con una lógica de priorización que permita obtener la posición relativa de pacientes entre todas las categorías.

La propuesta del estudio se basa en el cálculo del NAWD. Para realizar la priorización de pacientes, se debe contar con la categoría de cada paciente. Por otro lado, es importante saber la cantidad de días que el paciente lleva esperando. Para la priorización de los pacientes se calcula el NAWD, determinado por la siguiente fórmula [27]:

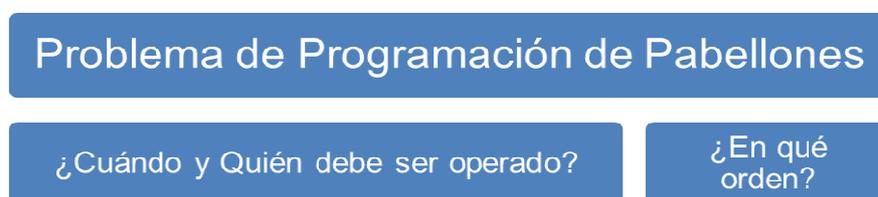
$$NAWD_i = P_i \cdot te_i \quad , \quad P_i \in \{1, 2, 4, 12, 48\} \quad (2.1)$$

donde  $te_i$  representa cuanto lleva esperando el paciente  $i$  en días, al momento de la programación, en días, del paciente  $i$  y  $P_i$  representa un factor relacionado con la categoría del paciente. Mientras más urgente el diagnóstico del paciente, mayor debería ser el  $P_i$ . Este número está estrictamente relacionado con los tiempos máximos de espera y representa la proporción entre estos. Se considera la categoría E (tiempo de espera máximo igual a un año) como el número menor y por simplicidad se toma  $P_i$  igual a 1. Para la categoría D (tiempo máximo de espera igual a 6 meses) se toma el doble, ya que un año es el doble de 6 meses. Para la categoría C (tiempo máximo de espera igual a 3 meses) se toma  $P_i$  igual a 4, ya que un año es 4 veces 3 meses. Una vez que se calculan los NAWD para cada paciente se pueden ordenar y este orden es el considerado como la lista priorizada.

## Capítulo 3

### Métodos Desarrollados

Una consideración importante de los métodos desarrollados es que el problema maestro se dividió en dos sub problemas. El primero, pretende solucionar qué día se opera cada paciente. El segundo problema, soluciona en qué orden se debe operar dentro del día, dado los pacientes que fueron asignados para cada día. Como se muestra en la Figura 3-1.



**Figura 3-1: Primera división del Problema Principal**

Esta consideración se plantea para simplificar el problema y debido principalmente a que el orden no altera la utilización del pabellón al momento de asignar los pacientes. En lo que sigue, el problema que se pretende resolver es en qué día operar a cada paciente y a qué pacientes operar. La determinación del orden (que determina la hora específica de intervención) se realizará luego de que cada paciente es asignado a una jornada (independientemente del método utilizado). En este caso se ordenan los distintos pacientes en la misma jornada considerando:

- Si existe paciente especial, éste se ubica a primera hora.
- Luego, se ordenan los pacientes por edad.

Como resultado de esta etapa se obtiene una calendarización de una semana con los horarios específicos de cada paciente. Esta técnica se puede utilizar para todos los métodos que serán presentados.

Otra simplificación del primer subproblema es separar la decisión de la asignación de pacientes a jornadas específicas, con el objetivo de repartir la carga de médicos proporcionalmente al total de horas que un médico opera en una semana. Esta simplificación se basa en el hecho que la repartición de la carga de médicos es un objetivo secundario en el problema de programación de pabellones de los hospitales estudiados.



**Figura 3-2: Segunda división del Problema Principal**

La idea es no considerar a priori el objetivo de la repartición de la carga de médicos en la asignación y una vez que se encuentre la solución óptima, tratar de mejorar el resultado con

un algoritmo que ayude a reasignar los médicos a pacientes, respetando todas las restricciones consideradas a priori. La repartición de carga de médicos (que determina qué médico opera en cada intervención) será abordada en la sección 3.2.

Los métodos desarrollados y que fueron comparados determinan a qué pacientes de una lista priorizada y en qué momento se debe operar para mejorar la utilización de los pabellones del hospital. Estos métodos de solución para el primer subproblema se describen en la sección 3.1. En la sección 3.2, se presenta el método que reparte la carga de trabajo de los médicos.

### **3.1 Métodos de Solución para el primer Subproblema**

En esta sección se presentan cuatro formas de resolver el problema de asignación y programación de pacientes. Los 3 primeros corresponden a modelos de programación entera y el cuarto corresponde a un algoritmo del tipo *Backtracking*.

#### **3.1.1 Modelo de programación entera**

El problema presentado puede ser resuelto mediante muchas perspectivas. La primera es formular un modelo de programación entera que resuelve el problema planteado. El modelo de programación entera se presenta a continuación.

##### **3.1.1.1 Índices y Parámetros**

A continuación se muestran las definiciones de los índices que son utilizados para el modelo:

*DOC1*: Médicos Principales

*i*: Día

*Pab*: Pabellones

*DOC2*: Médicos Secundarios

*P*: Paciente

Los parámetros de entrada del modelo de programación entera son los que se muestran a continuación:

$Dur_i$  : Duración del día  $i$  expresado en minutos

$SP_i$  : Sobrepasso horario máximo del día  $i$  expresado en minutos

$Op_{e_P}$  : Intervención quirúrgica que se debe realizar al paciente P

$Dura_p$  : Duración de la intervención que se le debe realizar al paciente P

$MN_i = \begin{cases} 1, & \text{Si el día } i \text{ se puede asignar un paciente Especial} \\ 0, & \text{En caso contrario} \end{cases}$

$Pri_p$  : Prioridad del paciente P (ver Sección 7.1)

$ESP_p = \begin{cases} 1, & \text{Si el paciente P es especial} \\ 0, & \text{En caso contrario} \end{cases}$

$Hor1_{DOC1}$  : Cantidad de horas contratadas del médico DOC1

$Hor2_{DOC2}$  : Cantidad de horas contratadas del médico DOC2

$Coins(DOC1, DOC2) = \begin{cases} 2, & \text{si } DOC1 = DOC2 \\ 1, & \text{En caso contrario} \end{cases}$

$f1_p^{DOC1} = \begin{cases} 1, & \text{Doctor DOC1 puede realizar la operacion del paciente P} \\ 0, & \text{En caso contrario} \end{cases}$

$$f2_P^{DOC2} = \begin{cases} 1, & \text{Doctor DOC2 puede realizar la operación del paciente P} \\ 0, & \text{En caso contrario} \end{cases}$$

$$f_P^{Pab} = \begin{cases} 1, & \text{En el Pabellon } Pab \text{ se puede realizar la operación del paciente P} \\ 0, & \text{En caso contrario} \end{cases}$$

$$DOCT_P^{DOC1} = \begin{cases} 1, & \text{Doctor DOC1 debe realizar la operación del paciente P} \\ 0, & \text{En caso contrario} \end{cases}$$

$$d1_i^{DOC1} = \begin{cases} 1, & \text{Si doctor DOC1 trabaja el día } i \\ 0, & \text{En caso contrario} \end{cases}$$

$$d2_i^{DOC2} = \begin{cases} 1, & \text{Si doctor DOC2 trabaja el día } i \\ 0, & \text{En caso contrario} \end{cases}$$

$$cor_i^{Pab} = \begin{cases} 1, & \text{Si el pabellon } Pab \text{ corresponde al día } i \\ 0, & \text{En caso contrario} \end{cases}$$

$$disp_i^P = \begin{cases} 1, & \text{Si paciente P está disponible el día } i \\ 0, & \text{En caso contrario} \end{cases}$$

$$Asig_P = \begin{cases} 1, & \text{Si el paciente } P \text{ tiene Doctor asignado} \\ 0, & \text{En caso contrario} \end{cases}$$

### 3.1.1.2 Variables

La variable de decisión del modelo es la siguiente:

$$t_i^{P,DOC1,DOC2,Pab} = \begin{cases} 1, & \text{Si se atiende al paciente } P \text{ con el doctor } DOC1 \\ & \text{y } DOC2, \text{ en el Pabellon } Pab \text{ el día } i \\ 0, & \text{En caso contrario} \end{cases}$$

La variable que indica si un sobrepaso horario es o no utilizado:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{Si se utiliza el Sobrepaso del día } i \\ 0, & \text{En caso contrario} \end{cases}$$

### 3.1.1.3 Restricciones

A continuación se presentan las restricciones del modelo de programación entera:

#### 3.1.1.3.1 Utilizar un pabellón disponible

Esta restricción apunta a evitar que se programen intervenciones en pabellones y días en los que no es factible realizar intervenciones. El número  $M_1$  debe ser mayor o igual que el máximo de intervenciones que es factible realizar en una jornada de trabajo.

$$\sum_{P, DOC1, DOC2} t_i^{P, DOC1, DOC2, Pab} \leq M_1 \cdot cor_i^{Pab} \quad , \quad \forall Pab, i \quad (3.1)$$

#### 3.1.1.3.2 Disponibilidad horaria de médicos

Estas restricciones apuntan a evitar que se programen intervenciones cuando no hay médicos que puedan realizar dichas intervenciones. El número  $M_2$  debe ser mayor que el máximo de intervenciones que puede realizar un médico en una jornada de trabajo.

$$\sum_{P, DOC2, Pab} t_i^{P, DOC1, DOC2, Pab} \leq M_2 \cdot d1_i^{DOC1} \quad , \quad \forall DOC1, i \quad (3.2)$$

$$\sum_{P, DOC1, Pab} t_i^{P, DOC1, DOC2, Pab} \leq M_2 \cdot d2_i^{DOC2} \quad , \quad \forall DOC2, i \quad (3.3)$$

### 3.1.1.3.3 Médicos diferentes

Esta restricción existe para evitar que el mismo médico sea asignado como médico principal y secundario en la misma intervención.

$$\sum_{Pab,i} Coins(DOC1,DOC2) \cdot t_i^{P,DOC1,DOC2,Pab} \leq 1, \forall P, DOC1, DOC2 \quad (3.4)$$

### 3.1.1.3.4 Disponibilidad horaria de pacientes

Esta restricción apunta a evitar que se programen intervenciones cuando los pacientes no están disponibles.

$$\sum_{DOC1,DOC2,Pab} t_i^{P,DOC1,DOC2,Pab} \leq disp_i^P, \forall i, P \quad (3.5)$$

### 3.1.1.3.5 Operar sólo una vez al paciente

Esta restricción limita el número de veces que se debe operar a cada paciente (a lo más una vez por periodo de programación).

$$\sum_{i,DOC1,DOC2,Pab} t_i^{P,DOC1,DOC2,Pab} \leq 1, \forall P \quad (3.6)$$

### 3.1.1.3.6 Forma de determinar al médico primario

Si existe médico asignado, sólo él debe realizar la intervención. Si no existe, entonces el médico debe saber realizar la intervención. Aquí,  $Asig_p$  es el parámetro que indica si el paciente tiene asignado o no al médico primario que debe realizar la intervención.

$$Asig_p \cdot DOCT_p^{DOC1} + (1 - Asig_p) \cdot f1_p^{DOC1} \geq \sum_{i, DOC2, Pab} t_i^{P, DOC1, DOC2, Pab}, \forall P, DOC1 \quad (3.7)$$

### 3.1.1.3.7 En el pabellón se debe poder realizar la intervención.

En los hospitales estudiados, no todos los pabellones eran iguales entre ellos. Existían algunos con algunas características especiales que permitían poder realizar determinados tipos de intervenciones. La siguiente restricción apunta a que no se programen intervenciones en pabellones en los cuales por las características de los pabellones no se puedan realizar las intervenciones específicas de los pacientes.

$$f_p^{Pab} \geq \sum_{i, DOC1, DOC2} t_i^{P, DOC1, DOC2, Pab}, \forall P, Pab \quad (3.8)$$

### 3.1.1.3.8 Límite de tiempo y activación de indicadores de sobrepasos horarios

La siguiente restricción indica que la programación en cada jornada no debe exceder el tiempo máximo, más un sobrepaso horario permitido,  $ST_i$ .

$$\sum_{P, DOC1, DOC2, Pab} Dura_p \cdot t_i^{P, DOC1, DOC2, Pab} \leq Dur_i + ST_i, \forall i \quad (3.9)$$

Es posible adjuntar a esta restricción algunas modificaciones que relacionan la variable  $x_i$  con la utilización de los minutos de sobrepaso horario en cada jornada.

$$\sum_{P,DOC1,DOC2,Pab} Dura_p \cdot t_i^{P,DOC1,DOC2,Pab} \leq Dur_i + ST_i \cdot x_i, \forall i \quad (3.10)$$

$$\sum_{P,DOC1,DOC2,Pab} Dura_p \cdot t_i^{P,DOC1,DOC2,Pab} \geq x_i \cdot Dur_i, \forall i \quad (3.11)$$

### 3.1.1.3.9 A lo más un paciente especial en cada mañana

Los pacientes considerados especiales deben ser programados únicamente a primera hora de la mañana. Esta condición hace que sea imposible programar más de un paciente en la mañana. El parámetro  $MN_i$  indica si la jornada es de mañana o no y como su valor es 0 ó 1 a lo más se podrá programar sólo un paciente especial (en cuyo caso  $ESP_p$  será 1).

$$\sum_{P,DOC1,DOC2,Pab} ESP_p \cdot t_i^{P,DOC1,DOC2,Pab} \leq MN_i, \forall i \quad (3.12)$$

### 3.1.1.3.10 La naturaleza de las variables

A continuación se muestra la naturaleza de las variables:

$$t_i^{P,DOC1,DOC2,Pab} \in \{0,1\}, \forall P, DOC1, DOC2, Pab, i \quad (3.13)$$

$$x_i \in \{0,1\}, \forall i \quad (3.14)$$

### **3.1.1.4 Función Objetivo**

La función objetivo del modelo de programación entera se compone de 3 sub-objetivos que deben ser cumplidos simultáneamente. La forma en la cual estos objetivos son abordados es mediante una suma ponderada de términos que representan estos 3 objetivos. A continuación se presentan estos objetivos:

#### **3.1.1.4.1 Respeto de la prioridad**

Una de las consideraciones del problema a resolver es el respeto de la prioridad relativa de los pacientes. Como se observó en el desarrollo de este proyecto de tesis, es importante saber cómo se construye esta prioridad, ya que representa un tema muy relevante que puede complicar en gran medida un modelo de programación entera.

Uno de los lineamientos del proyecto, del cual es parte esta investigación, es brindar más justicia en la asignación de pabellones. Esta justicia proviene de la definición de reglas claras basadas en consideraciones médicas explícitas y de conocimiento público, que son utilizadas en conjunto con el tiempo de espera de cada paciente para el cálculo de una posición relativa.

La forma en la cual se calcula la posición relativa de los pacientes en una lista de espera (que se muestra en la Sección 2.3) permite la priorización de pacientes. Sin embargo, esta metodología no indica cómo esta prioridad es incorporada a la decisión de asignación.

Es importante tener en cuenta que una consideración del carácter económico no es bien vista por el personal del hospital. Como el título de esta tesis lo indica, el objetivo del desarrollo está centrado en hospitales del sector público, donde la toma de decisiones que afectan a los pacientes se basa en criterios médicos.

En la investigación previa al desarrollo de los modelos se intentó llegar a un acuerdo con los médicos sobre los criterios de asignación. De esta investigación aparece la siguiente regla lexicográfica: “Es mejor operar a un paciente urgente, que todo el resto de pacientes menos prioritarios que éste”<sup>vi</sup>. Esta regla entrega una aproximación a lo deseado por los médicos en lo que refiere a la decisión de asignación de pabellones.

Esta regla también es consistente con una implementación de carácter rutinario, ya que si un paciente no es rentable desde el punto de vista económico, tampoco lo será para el periodo siguiente e incluso para un periodo siguiente podría ser menos rentable. Incorporar parámetros que permitan solucionar estos temas complicaría el modelo y no es claro que la información necesaria esté disponible por parte del hospital.

Una alternativa para modelar la forma en la cual la prioridad es incorporada a la decisión es la que se muestra a continuación:

$$\lambda_F \cdot \sum_{i,P,DOC1,DOC2,Pab} PRI_p \cdot t_i^{P,DOC1,DOC2,Pab} \quad (3.15)$$

donde  $PRI_p$  es un valor que es mayor para los pacientes con prioridades más altas (ver Sección 7.1). Esta forma de modelar la prioridad respeta la regla lexicográfica definida por el personal del hospital.  $\lambda_F$  es un ponderador que permite establecer el peso de esta sumatoria cuando existe más de este término en la función objetivo.

#### 3.1.1.4.2 Penalización de sobrepasos horarios

El término  $x_i$  toma el valor 1 si utiliza el sobrepaso horario de la jornada  $i$ . Este término permite incorporar a la función objetivo una penalización por el uso de los sobrepasos horarios en conjunto con un parámetro  $\lambda_H$  (constante para todos los días), que permite modelar el peso

---

<sup>vi</sup> Conclusión reuniones HEGC, año 2010

de este criterio en función de otros que aparecen en esta función objetivo. Es decir, en la función objetivo aparece:

$$\lambda_H \cdot \sum_i x_i \quad (3.16)$$

### 3.1.1.4.3 Pacientes más urgentes al principio de la semana

La idea detrás de este término es entregar una bonificación por operar primero en el intervalo de programación a un paciente más urgente. Es decir, en la función objetivo aparece un término como el que se muestra a continuación:

$$\lambda_s \cdot \sum_{i,P,DOC1,DOC2,Pab} (\delta_i^P \cdot t_i^{P,DOC1,DOC2,Pab}) \quad (3.17)$$

donde  $\lambda_s$  permite modelar el peso de este criterio en función de otros que aparecen en esta función objetivo.

Los valores de los  $\delta_i^P$  pueden ser determinados de muchas maneras para cumplir con este sub-objetivo. El caso más simple y que demostró cumplir con el sub-objetivo específico corresponde a utilizar los valores que son determinados de la siguiente manera:

$$\delta_i^P = M - (P-1) - (i-1) \quad (3.18)$$

donde M debe ser mayor que el máximo número de pacientes más el número de jornadas. Es importante considerar que los pacientes deben estar ordenados según su prioridad y los días en orden secuencial.

Con esto se tiene que el valor de  $\delta_i^P$  es de la siguiente forma:

		Pacientes			
		P = 1	P = 2	P = 3	...
Jornadas	i = 1	M	M-1	M-2	...
	i = 2	M-1	M-2	M-3	...
	i = 3	M-2	M-3	M-4	...
	i = 4	M-3	M-4	M-5	...
	i = 5	M-4	M-5	M-6	...
	...	...	...	...	...

**Tabla 3-1: Ponderador de pacientes urgentes al principio de la semana**

Con esto, la función objetivo del modelo queda de la forma que se muestra a continuación:

$$\max \lambda_F \cdot \sum_{i,P,DOC1,DOC2,Pab} PRI_P \cdot t_i^{P,DOC1,DOC2,Pab} - \lambda_H \cdot \sum_i x_i + \lambda_S \cdot \sum_{i,P,DOC1,DOC2,Pab} (\delta_i^P \cdot t_i^{P,DOC1,DOC2,Pab}) \quad (3.19)$$

En esta fórmula, por simplicidad del modelo,  $\lambda_F$  puede ser considerado para todos los casos como 1. En este modelo se utilizaron valores de  $\lambda_H$  y  $\lambda_S$  elegidos luego de realizar algunas pruebas. Estos valores están relacionados con las consideraciones de prioridad relativa entre los distintos sub-objetivos que pondera cada valor, siendo muy importante respetar la prioridad del paciente y menos importante la consideración que los pacientes más prioritarios se encuentren al principio de cada semana. Los valores elegidos de estos parámetros del modelo se muestran a continuación:

$$\lambda_H = PRI_{\lfloor N/2 \rfloor} \quad (3.20)$$

$$\lambda_S = PRI_{\lfloor N/4 \rfloor} \quad (3.21)$$

donde N es el número de pacientes de cada escenario. Es fácil observar que el valor de  $\lambda_H$  es mayor que el de  $\lambda_S$ . Por otro lado, utilizando estos valores, en la función objetivo, un día con

sobrepaso horario equivale a no asignar al paciente cuya prioridad está en el medio de la lista ordenada de pacientes. En el caso del sub-objetivo de preferir pacientes más prioritarios al principio del periodo de programación, en la función objetivo se agregaría, por ejemplo  $M$  veces  $\lambda_S$  si el paciente con más prioridad se programa en la primera jornada, donde  $\lambda_S$  toma un valor equivalente a asignar al paciente cuya prioridad es la del paciente ubicado en la tercera mitad de la lista de pacientes que se desea programar.

### 3.1.1.5 Variante del modelo

En la función objetivo, hasta ahora presentada, se expresan básicamente 3 sub-objetivos. Una perspectiva es dejar el sub-objetivo más importante en la función objetivo y los otros dos bajarlos a las restricciones imponiendo sobre estos ciertas condiciones. En este caso, el objetivo principal es la prioridad del paciente. Luego, la función objetivo queda de la siguiente forma:

$$\max \sum_{i,P,DOC1,DOC2,Pab} PRI_p \cdot t_i^{P,DOC1,DOC2,Pab} \quad (3.22)$$

En este caso se deben considerar dos restricciones adicionales, una es la que representa el objetivo que busca que los pacientes más urgentes sean asignados al principio de la semana. La restricción que se agrega y que está asociada a este sub-objetivo se muestra a continuación:

$$\sum_{i,P,DOC1,DOC2,Pab} (\delta_i^P \cdot t_i^{P,DOC1,DOC2,Pab}) \geq \gamma_S \quad (3.23)$$

Por otro lado, la restricción que representa la penalización de sobrepasos horarios debe ser agregada al modelo. En este caso, la restricción que se agrega y que está asociada a este sub-objetivo es la siguiente:

$$\sum_i x_i \leq \gamma_H \quad (3.24)$$

Es importante determinar los valores de  $\gamma_s$  y  $\gamma_H$ , ya que determinadas combinaciones de estos valores pueden hacer que el problema sea infactible, dependiendo del escenario. Para el caso de  $\gamma_s$  se utilizó el siguiente valor:

$$\gamma_s = \delta_1^1 \tag{3.25}$$

Esto corresponde al valor de  $\delta$  cuando el paciente más prioritario es asignado el lunes en la mañana. En este caso no se está forzando a que esto ocurra, ya que mediante otras combinaciones de pacientes y jornadas se puede obtener este valor.

Por otro lado, para el caso de  $\gamma_H$  se utilizó simplemente la mitad de las jornadas programadas como máximo. Este valor fue elegido a partir de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas al modelo de programación entera. El estudio de ambos modelos es mostrado por separado en la sección de resultados.

### 3.1.2 Modelo de programación entera con prioridad modificada

El modelo que se detalla a continuación corresponde a un modelo de programación entera con modificaciones específicamente en lo relacionado con la prioridad. Este modelo también resuelve a quién operar y cuándo hacerlo, como se muestra en la Figura 3-3.



**Figura 3-3: Modelo de programación entera con prioridad modificada**

Para entender lo que aquí se plantea, se debe antes explicar cómo funciona la priorización de los pacientes. Esto se explicó en la sección 2.3. Para este tipo de solución se propone modificar parcialmente la forma en la cual se priorizan los pacientes y hacerla más adecuada para el modelo.

Se propone calcular nuevos pesos para la función objetivo en lugar de  $PRI_p$  (ver sección 7.1) que mantengan la propiedad de ser mayores para pacientes con mayor prioridad. La idea es conservar el carácter exponencial de la prioridad, pero por segmentos. Es decir, la fórmula de cálculo del peso de la prioridad debe tener un término que aumente exponencialmente en función de categoría que es determinada por la categoría biomédica y el vencimiento de los tiempos de espera máximos asignados a ésta. Un efecto de esta segmentación es que los pacientes serán agrupados en función de sus características. Esto introduce un efecto negativo asociado a los tiempos quirúrgicos, ya que al interior de cada grupo de pacientes que cumplen con similares condiciones biomédicas y de tiempos de espera, el modelo preferirá asignar a los de menor duración. Para poder manejar este efecto una alternativa es que el modelo incluya en su función objetivo el tiempo quirúrgico.

La propuesta es utilizar pesos de la siguiente forma:

$$w_p = \alpha^{CAT_p} \cdot Qx_p^\beta \quad (3.26)$$

donde  $Qx_p \in \{1, 2, \dots, 10\}$  y representa una proporción del tiempo quirúrgico del paciente P, el cual puede ser discretizado en enteros del 1 al 10 y  $CAT_p \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$  depende del tiempo de espera que lleva el paciente y la categoría, que puede ser A, B, C, D o E que depende del diagnóstico y los agravantes de cada paciente. En esta función  $\alpha$  y  $\beta$  toman valores enteros elegidos correctamente para evitar que el valor de  $w_p$  crezca, como en el caso de  $PRI_p$ , y que permita llegar a resultados similares a los que se obtiene en el modelo que utiliza este valor.

En la siguiente tabla se muestra cómo se calculan los  $CAT_p$ .

	1 Sem	1 Mes	3 Meses	6 Meses	1 Año
A	3	4	5	5	5
B	2	3	4	5	5
C	1	2	3	4	5
D	1	1	2	3	4
E	1	1	1	2	3

**Tabla 3-2: Cálculo de los  $CAT_p$**

Las categorías médicas mencionadas son definidas por los mismos médicos, así como los tiempos de espera máximos que aquí son mencionados.

En este modelo, es posible ver que en el peor de los casos  $w_p$  es:

$$\max w_p = \alpha^5 \cdot 10^\beta \quad (3.27)$$

Aquí, es posible observar que este valor no depende de N (el número de pacientes). Para que se consideren como valores positivos la categoría y el tiempo quirúrgico, los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  deben ser ambos mayores que 1. Por otro lado, la idea es que, en el peor de los casos  $w_p$  sea del orden  $10^4$ . Cuando  $\alpha$  toma el mínimo valor, para cumplir con la restricción anterior  $\beta$  debe ser como máximo 4. Cuando  $\beta$  toma el mínimo valor, para cumplir con la restricción anterior,  $\alpha$  debe ser como máximo 5. Esto entrega límites para determinar los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  que mejor modelan el problema.

A modo de ejemplo, se muestra una tabla donde se calcularon los valores de  $\max(w_P)$  para valores enteros de  $\alpha$  y  $\beta$ . Esto permite focalizar el estudio de valores.

		$\alpha$								
		1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$\beta$	1	10	76	320	977	2430	5252	10240	18453	31250
	1,5	32	240	1012	3088	7684	16609	32382	58353	98821
	2	100	759	3200	9766	24300	52522			
	2,5	316	2401	10119	30882	76843				
	3	1000	7594	32000	97656					
	3,5	3162	24014							
	4	10000								

**Tabla 3-3: Valores de  $\alpha$  y  $\beta$  para  $\max(w_P)$**

Para estimar que valores de  $\alpha$  y  $\beta$  deben ser utilizados, se analizaron diferentes valores de  $\alpha$  y  $\beta$ . Estas pruebas se realizaron para determinar valores adecuados de  $\alpha$  y  $\beta$ , pero no corresponden a las pruebas realizadas para comparar modelos. Se utilizaron 3 escenarios diferentes y se estimó para cada resultado el Indicador de la calidad del resultado desde el punto de vista de la prioridad (ver sección 1.6.2.2), determinado de la siguiente manera:

$$IC_A = \log_{10} \sum_{P \in A} PRI_P \quad (3.28)$$

donde A es el conjunto de pacientes asignados por el modelo. Como se vio en la sección 1.6.2.2 este valor representa la calidad de la solución en función del respeto de la prioridad.

En la siguiente tabla se muestra la descripción de los 3 escenarios utilizados para estimar los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  (ver Sección 1.5):

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Número de pacientes	100	100	100
Duración de intervención [min]	90	90	120
Número de jornadas que se opera	10	10	10
Número de Jornadas por paciente	3,5	2,5	2,5

**Tabla 3-4: Descripción de escenarios de pruebas**

A continuación se muestra los valores obtenidos de los  $IC_A$  del primer escenario, en cada tabla se destacaron los casos en los cuales se obtuvo el mejor resultado del escenario respectivo:

		$\alpha$									
		1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	
$\beta$	1		30,10263	30,10295	30,10295	30,10295	30,10295	30,10295	30,10295	30,10295	30,10295
	1,5	19,88253	29,91951	30,10295	30,10295	30,10295	30,10295	30,10295	30,10295	30,10295	30,10295
	2	29,80870	29,91952	30,05796	30,05796	30,10263	30,10263				
	2,5	29,80870	29,90503	30,05796	30,05796	30,05796					
	3	29,90427	29,90503	29,91952	29,91709						
	3,5	29,90427	29,94518								
	4	29,90427									

**Tabla 3-5: Indicador de la calidad del resultado desde el punto de vista de la prioridad de la asignación entregada por las pruebas para determinar  $\alpha$  y  $\beta$  para el Escenario 1**

Se observa que los valores de los  $IC_A$  son, en magnitud, similares entre sí. Sin embargo, como se mostró en la sección 1.6.2.2, pequeñas diferencias en los decimales pueden reflejar importantes diferencias desde el punto de vista de la prioridad de los pacientes asignados. Este resultado motiva la realización de pruebas bajo distintos escenarios, ya que por sí solo no ayuda a determinar la elección de valores de  $\alpha$  y  $\beta$  que permitan entregar los mejores resultados posibles para el modelo de programación entera con prioridad modificada.

A continuación se muestra la tabla con los resultados del  $IC_A$  para determinar los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  utilizando el Escenario 2:

		$\alpha$								
		1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$\beta$	1		30,10263	30,10298	30,10298	30,10263	30,10298	30,10263	30,10298	30,10298
	1,5	26,36570	29,91691	30,10298	30,10298	30,10298	30,10298	30,10298	30,10298	30,10298
	2	29,80870	29,91693	30,10263	30,10263	30,10263	30,10298			
	2,5	29,80870	29,90436	29,91693	29,91692	30,10263				
	3	29,90428	29,90436	29,91693	29,91693					
	3,5	29,90428	29,94526							
	4	29,90428								

**Tabla 3-6: Indicador de la calidad del resultado desde el punto de vista de la prioridad de la asignación entregada por las pruebas para determinar  $\alpha$  y  $\beta$  para el Escenario 2**

Al igual que en el caso anterior, este resultado por sí solo no permite determinar los valores óptimos de  $\alpha$  y  $\beta$ . Sin embargo, muestra una ligera tendencia a señalar dónde se encontrará esta combinación de valores. Finalmente, se muestra la tabla con los resultados de las pruebas utilizando el Escenario 3:

		$\alpha$								
		1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$\beta$	1		30,05246	30,09933	30,06744	29,92997	29,92997	29,92997	29,92997	29,92997
	1,5	23,48372	29,90595	30,05246	30,05246	30,05246	29,90927	29,92997	29,92997	29,92997
	2	27,99665	29,90597	29,90662	29,90662	29,90927	29,90927			
	2,5	28,02293	29,90461	29,90529	29,90529	29,90662				
	3	28,02293	29,90461	29,90462	29,90529					
	3,5	28,02293	29,90461							
	4	28,02293								

**Tabla 3-7: Indicador de la calidad del resultado desde el punto de vista de la prioridad de la asignación entregada por las pruebas para determinar  $\alpha$  y  $\beta$  para el Escenario 3**

Aquí, es posible observar que existe una combinación de valores de  $\alpha$  y  $\beta$  que entrega el mejor resultado. Ésta combinación también es consistente con los dos resultados anteriores. No obstante, estos resultados dependen de los escenarios estudiados. Elegir otra combinación

de  $\alpha$  y  $\beta$  para ser estudiado, puede entregar información adicional en escenarios diferentes a los estudiados. Esta combinación fue elegida dentro de los mejores resultados de los escenarios 1 y 2 y corresponde a  $\alpha$  igual a 5 y  $\beta$  igual a 1.

Con esto, la función objetivo utilizada en este método queda de la siguiente manera:

$$\max \lambda_F \cdot \sum_{i,P,DOC1,DOC2,Pab} w_P \cdot t_i^{P,DOC1,DOC2,Pab} - \lambda_H \cdot \sum_i x_i + \lambda_S \cdot \sum_{i,P,DOC1,DOC2,Pab} (\delta_i^P \cdot t_i^{P,DOC1,DOC2,Pab}) \quad (3.29)$$

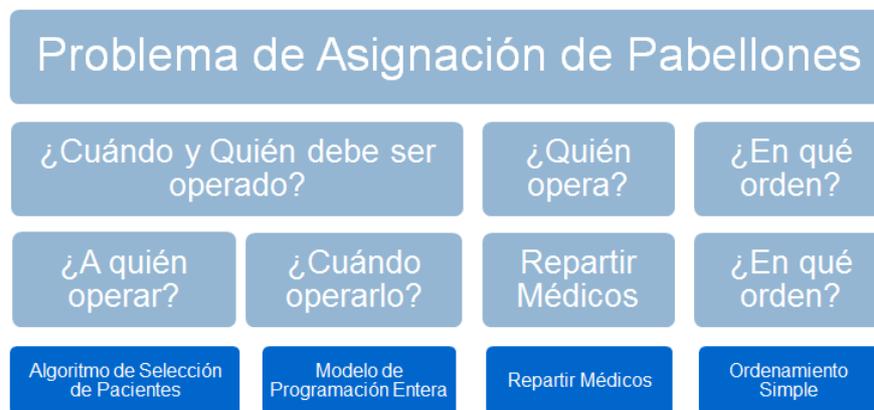
En esta fórmula aparece que el valor de  $\lambda_F$  puede ser tomado como uno. Este valor se tomó por simplicidad del modelo. En este modelo se utilizaron valores de  $\lambda_H$  y  $\lambda_S$  elegidos luego de realizar algunas pruebas. Este valor se eligió independiente del número de pacientes y sólo dependiente del valor del  $w_P$  del paciente más prioritario. Los valores ocupados de estos parámetros del modelo se muestran a continuación:

$$\lambda_H = \frac{\max(w_P)}{2} \quad (3.30)$$

$$\lambda_S = \frac{1}{\left(\frac{\max(w_P)}{2}\right)} \quad (3.31)$$

### 3.1.3 Modelo de programación entera con asignación independiente

Esta solución es también motivada por el término que crece exponencialmente en la función objetivo visto en la sección 3.1.1.4.1. La idea detrás de este modelo es dividir nuevamente el problema en dos partes: la primera, es resolver el problema de quién debe ser operado; y la segunda, es resolver cuándo operar a los pacientes que se decidió intervenir. Como se muestra en la Figura 3-4.



**Figura 3-4: Modelo de programación entera con asignación independiente**

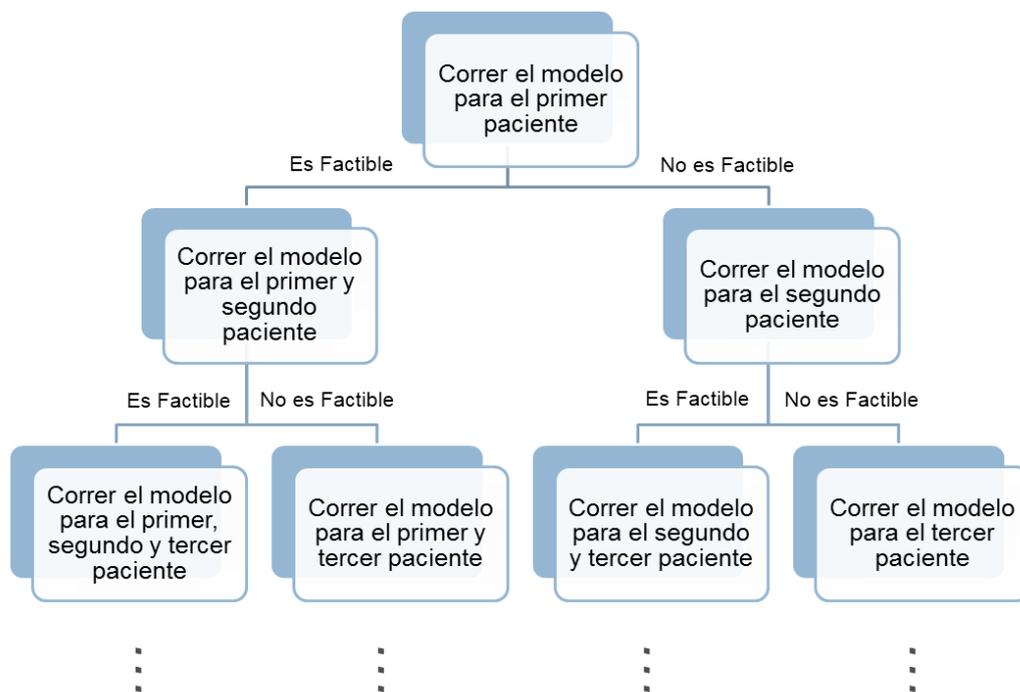
Es decir, se agrega un método computacional que se encarga de determinar qué pacientes sean factibles de operar, para mejorar la utilización y quiénes no pueden ser operados, por problemas de factibilidad. También, se agrega un modelo de programación entera para definir cuándo se operaran los pacientes factibles.

El método consta de dos partes, éstas son descritas a continuación:

### 3.1.3.1 Problema de asignación

El problema de “A quién operar” puede ser resuelto por un árbol binario que recorra por paciente (en orden de prioridad) y ejecute un modelo de factibilidad para saber si dicho paciente puede ser asignado o no. Esto significa correr un modelo de factibilidad  $n$  veces.

En la siguiente figura se muestra como se construye el algoritmo computacional:



**Figura 3-5: Problema de asignación**

Esta figura muestra la primera parte del modelo, básicamente se ejecuta el modelo considerando sólo al primer paciente (de la lista de espera). En caso de existir una solución factible, se vuelve a ejecutar el modelo de factibilidad, pero esta vez para el primer y segundo paciente, en caso de no ser factible para el primero, se ejecuta el modelo considerando sólo al

segundo paciente. Al final de este algoritmo computacional se tiene la lista de todos los pacientes que es factible asignar, respetando el criterio de prioridad. Como la búsqueda de factibilidad se hace en el orden de prioridad, los pacientes son asignados respetando este orden de manera estricta. Es decir, ni un paciente asignado entra en conflicto con un paciente de mayor prioridad, ya que si el paciente de mayor prioridad no fue asignado antes, es porque no es factible de ser asignado y no porque el método elija a otro de menor prioridad.

Lo que sigue es encontrar la solución óptima con un modelo de calendarización que asigne los pacientes, de la mejor manera posible.

### 3.1.3.2 Problema de Calendarización

El problema de la calendarización puede ser resuelto con un modelo de programación entera que ya no considera la prioridad, al final de recorrer el árbol. Como los pacientes son establecidos en el punto anterior en este punto se debe considerar sólo a los pacientes que fueron asignados.

El modelo que se debe utilizar en esta etapa es muy parecido al modelo de programación entera descrito en la sección 3.1. La principal diferencia está en la función objetivo, la cual no contiene el término que indica el respeto de la prioridad, descrito en la sección 3.1.1.4.1. Otra de las diferencias es que los pacientes no son todos los pacientes disponibles, sino sólo los que son asignados en la sección anterior. Con esto la función objetivo queda de la siguiente forma:

$$\max \quad -\lambda_H \cdot \sum_i x_i + \lambda_S \cdot \sum_{\substack{i, DOC1, \\ DOC2, Pab \\ p \in A}} (\delta_i^P \cdot t_i^{P, DOC1, DOC2, Pab}) \quad (3.32)$$

donde A es el conjunto de los pacientes asignados en la sección anterior.

Por simplicidad se utilizará el valor de  $\lambda_S$  igual a 1. Luego, el valor de  $\lambda_H$  se eligió de tal forma que fuera igual al mayor valor que puede tomar el otro término de la función objetivo. El valor ocupado se muestra a continuación:

$$\lambda_H = \max \left( \lambda_S \cdot \sum_{\substack{i, DOC1, \\ DOC2, Pab \\ p \in A}} (\delta_i^P \cdot t_i^{P, DOC1, DOC2, Pab}) \right) \quad (3.33)$$

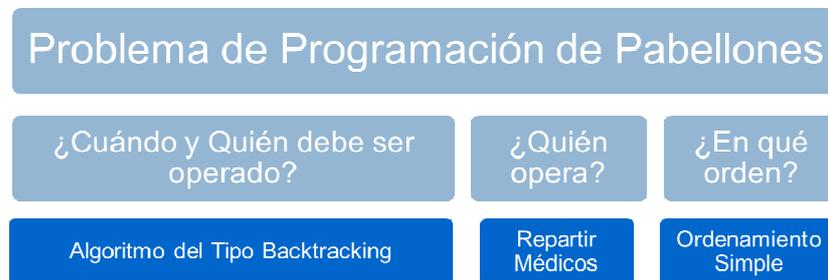
luego,

$$\lambda_H = \sum_{i, P} (\delta_i^P) \quad (3.34)$$

Este valor depende de N y de las jornadas utilizadas en cada escenario.

### 3.1.4 Algoritmo del tipo Backtracking

Como se mencionó anteriormente, el problema planteado puede ser resuelto mediante distintas perspectivas. Una de éstas es desarrollar un algoritmo computacional que encuentre soluciones factibles, dependiendo de las reglas de asignación definidas por el hospital. Una vez teniendo estas soluciones se puede evaluar cuál de estos resultados es la más conveniente. (ver Figura 3-6).



**Figura 3-6: Algoritmo del Tipo Backtracking**

La idea se basa en un algoritmo de *Backtracking* (ver Sección 7.2), incluyendo algunas modificaciones para poder resolver este problema particular. A continuación se presentan las etapas del modelo desarrollado para solucionar el problema de la asignación de pabellones. Estas etapas son claves para entender el funcionamiento del algoritmo del tipo *Backtracking* y cuando son aplicadas las distintas reglas y restricciones del problema.

### 3.1.4.1 Creación de Nodos

Esta etapa consiste en generar nodos o jornadas en las cuales se puede operar un paciente. Por paciente, se debe señalar la factibilidad de realizar en cada jornada con las siguientes consideraciones:

- Duración de la intervención (que no sobrepase el largo de la jornada)
- Disponibilidad del médico que puede realizar esa intervención
- Si la intervención es Especial. (éstas no pueden ser operadas en las jornadas de la tarde)

Por ejemplo, en la siguiente tabla se ejemplifica para los primeros 4 pacientes de la lista de espera priorizada, señalando con un “1” cuando es factible y con un “0” si no se puede realizar la intervención quirúrgica de ese paciente, en esa jornada.

	Paciente 1	Paciente 2	Paciente 3	Paciente 4	...
<b>Lunes Mañana</b>	1	0	0	0	...
<b>Lunes Tarde</b>	0	1	0	0	...
<b>Martes Mañana</b>	0	0	1	1	...
<b>Martes Tarde</b>	0	0	1	0	...
<b>Miércoles Mañana</b>	0	0	0	1	...
<b>Miércoles Tarde</b>	0	0	0	0	...
<b>Jueves Mañana</b>	1	1	0	1	...
<b>Jueves Tarde</b>	0	0	0	0	...
<b>Viernes Mañana</b>	0	0	1	1	...
<b>Viernes Tarde</b>	0	0	0	0	...

**Tabla 3-8: Tabla Ejemplo de Nodos**

En la tabla se observa que el paciente 1 podría ser operado el lunes en la mañana o el jueves en la mañana. Estos dos últimos casos corresponden a los nodos del paciente uno. Este procedimiento es realizado para todos los pacientes en la lista de espera.

#### **3.1.4.2 Creación de Rutas**

La Creación de Rutas es un método que permite construir combinaciones factibles, denominadas rutas, entre los nodos de los pacientes (soluciones factibles). En este punto se consideran:

- Factibilidad de cada nodo agregado (proveniente de lo anterior)
- No pueden existir más de dos intervenciones especiales en una jornada.
- Total de duraciones acumuladas para cada ruta no exceda la duración de la jornada.

La técnica de este método es generar arreglos que contengan los nodos de los pacientes asignados a una misma ruta. Cada vez que se genera un arreglo (o combinación de nodos) se ingresa a una pila (o *stack*) de dos entradas. Cuando se recorren todos los nodos de un paciente se extrae un elemento de la pila y se comprueba la factibilidad de agregar un nodo del paciente siguiente al arreglo extraído. Si es factible, ese nodo se agrega al arreglo y el arreglo ingresa nuevamente a la pila. Si no es factible se prueba con otro nodo del paciente siguiente.

Como consecuencia de la aplicación del método, la pila tendrá al final del proceso rutas con el máximo de nodos factibles (pacientes asignados) y respetando la prioridad.

#### **3.1.4.3 Salto de Nodos**

Cuando los nodos de un paciente no pueden ser asignados a ninguna ruta este nodo no es agregado y se continúa con el paciente que tenga la prioridad más cercana a dicho paciente. Para lograr esto se definen 2 pilas donde la segunda pila almacena todas las rutas que no pudieron ser agregadas nuevamente a la pila principal. En el caso que ninguna ruta pudo ser

vuelta a agregar a la pila principal (es decir, un paciente no puede ser asignado a ninguna ruta) entonces se continúa con el paciente siguiente y la pila principal pasa a ser la secundaria.

#### **3.1.4.4 Evaluación de soluciones factibles**

El resultado de la etapa anterior puede entregar más de una solución factible (ej.: intercambio de dos pacientes parecidos entregaría dos soluciones diferentes). En esta etapa se evalúan las soluciones con las siguientes consideraciones:

- Los pacientes menores de 3 años es mejor operarlos en la mañana.
- Mientras menor sea la edad del paciente se incrementa la prioridad por operarlos en la mañana.
- Las intervenciones más urgentes se intentan operar en los primeros días de la semana.

En esta etapa se genera una matriz similar a la de nodos, pero con valores enteros en lugar de unos y ceros. Estos valores dependen de los pesos o factores de multiplicación asignados a las diferentes reglas de negocios aplicadas en esta etapa. Como resultado de esta etapa se obtiene una solución factible y que es mejor que las otras combinaciones.

## **3.2 Método de Solución para el segundo Subproblema**

Una vez que se tiene una solución de asignación de pacientes (independiente del método utilizado), ésta puede ser mejorada cambiando los médicos asignados de manera de mejorar la asignación horaria. Esta asignación se realiza en función de un porcentaje definido por el hospital. En algunos casos, este porcentaje depende de la cantidad de horas contratadas de cada médico.

Para no complicar el análisis se puede utilizar la misma técnica para todos los modelos. El método utilizado es bastante simple. Lo primero, es calcular la proporción del tiempo total que cada paciente utiliza. Esta proporción está dada por la siguiente fórmula:

$$PPac_p = \frac{Dura_p}{\sum_{k \in A} Dura_k} \quad (3.35)$$

donde  $A$  es el conjunto de todos los pacientes asignados.

Luego, se debe calcular el porcentaje del tiempo que cada médico debe operar en relación a los demás médicos. Este porcentaje está dado por la siguiente fórmula:

$$PDoc_{DOC} = \frac{Ocup_{DOC}}{\sum_{j \in D} Ocup_j} \quad (3.36)$$

donde  $D$  es el conjunto de todos los médicos que operan.

Luego, se ordenan los médicos según su porcentaje de mayor a menor. Se verifica para el primer paciente (se utiliza el orden dado por la prioridad) si es posible asignar un médico de la lista recorriendo el orden (es decir, cumple con todas las restricciones de estar disponible, saber operar la intervención, etc.). De encontrar uno, entonces se asigna y se resta el porcentaje de tiempo del paciente al porcentaje del médico. Luego, se reordenan los médicos por su porcentaje de mayor a menor y se continúa con el siguiente paciente.

Este simple método permite repartir de una manera más equitativa la carga entre médicos que poseen distintos niveles esperados de ocupación. La solución de los métodos desarrollados anteriormente sólo busca alternativas factibles en lo que se refiere a la carga de los médicos.

Como ejemplo se puede considerar el siguiente caso: 2 pacientes (P1 y P2), una jornada, un pabellón, 3 médicos(a, b y c), sin pacientes especiales, todos los médicos saben operar las 2 intervenciones, los dos pacientes se pueden operar en la jornada disponible, las duraciones de las intervenciones son iguales y suman menos que la duración de la jornada, los dos médicos están disponibles en la jornada y la ocupación esperada de ambos es la misma. Una solución posible de todos los métodos anteriores es: operar en la jornada disponible al paciente P1 y el P2 (operados por los médicos a y b). Al inicio del método  $PPac_{P1}$  y  $PPac_{P2}$  son iguales a 0,5 y  $PDoc_a$ ,  $PDoc_b$  y  $PDoc_c$  son iguales a 0,333. Para la etapa que corresponde al paciente 1 se tiene:

	Inicio	Al asignar paciente 1	Decisión
$PDoc_a$	0,333	-0,167	Asignar Médico a
$PDoc_b$	0,333	-0,167	Asignar Médico b
$PDoc_c$	0,333	0,333	-

**Tabla 3-9: Etapa del paciente 1**

Luego de esto se debe reordenar de mayor a menor los médicos, luego se tiene

	Inicio	Al asignar paciente 1	Decisión
$PDoc_c$	0,333	-0,167	Asignar Médico c
$PDoc_a$	-0,167	-0,667	Asignar Médico a
$PDoc_b$	-0,167	-0,167	-

**Tabla 3-10: Etapa del paciente 2**

Para este ejemplo se muestra el efecto del método, la carga está mejor repartida, ya que luego de la aplicación el médico c puede operar. Este método no espera encontrar la solución óptima, pero espera mejorar la primera solución donde los médicos son asignados según factibilidad, pero no se reparte la carga.

# Capítulo 4

## Resultados

En este capítulo se presentan los resultados y el análisis de las pruebas realizadas a los modelos desarrollados en escenarios que fueron definidos a partir de casos reales. Uno de estos escenarios es presentado en la sección 7.3. En base a estos casos reales se realizaron algunas variaciones a los datos de entrada para analizar el comportamiento de los modelos. Los escenarios estudiados, representan la planificación semanal de una especialidad con 2 pabellones disponibles. En la sección 4.5 se compara el resultado de los modelos con respecto a lo que ocurrió en las situaciones reales.

## **4.1 Parámetros que definen los escenarios de estudio**

Como se vio en la sección 1.5 los escenarios quedan definidos si se establece el número de pacientes que ingresan al modelo, los tiempos de duración de intervenciones en función del tiempo de duración de las jornadas, el número de Jornadas y/o pabellones disponibles y el número de jornadas en las que se pueden programar pacientes. A continuación se muestran los parámetros utilizados en las pruebas realizadas.

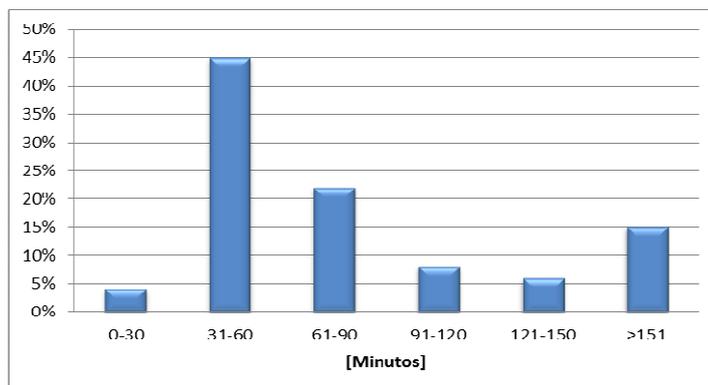
### ***4.1.1 Número de pacientes***

Los modelos desarrollados fueron pensados para mejorar el desempeño de la programación en casos reales, en los cuales la demanda es mayor que la oferta de pabellones. En una semana, una especialidad con 10 jornadas disponibles opera cerca de 25 pacientes. Por simplicidad se eligió el doble de pacientes como número mínimo, dentro de los cuales se seleccionarán los pacientes en función de sus características.

Dado el número de pacientes asignados en casos reales, incluir más de 200 pacientes no tiene sentido, ya que las prioridades de los últimos son relativamente muy bajas. Por otro lado, dentro de 200 pacientes debe ser posible encontrar un grupo que cumpla con las características requeridas para ser asignado. Para evaluar el desempeño de los modelos en los escenarios se consideraron 50, 100 y 200 pacientes.

### ***4.1.2 Tiempos de duración de intervenciones en función de la duración de la jornada.***

Para el caso de la duración de las intervenciones, se utilizó información histórica del hospital. Las intervenciones realizadas durante un mes por una especialidad estudiada tienen tiempos que se distribuyen de la siguiente manera:



**Gráfico 4-1: Distribución de tiempos de duración de intervenciones quirúrgicas**

La duración de la cada intervención depende de la intervención en particular. Sin embargo, en algunas especialidades los promedios de duración de sus intervenciones son menores que en otras, debido a la complejidad asociada a cada especialidad.

Los tiempos quirúrgicos del escenario estudiado son 90 minutos promedio. Por lo que se estudiaron escenarios basados en éste, cuyos tiempos promedios fueran de 60 y 120 minutos. En el peor de los casos la intervención quirúrgica dura 20 minutos (debido a los tiempos de preparación y limpieza) por los que además se analizó el caso en el cual, en promedio, los tiempos quirúrgicos son de 30 minutos. La proporción de tiempos presentada en el gráfico anterior se mantuvo para todos los escenarios estudiados y sólo se modificó el promedio.

Con estas consideraciones se estudiaron 4 situaciones: 30, 60, 90 y 120 minutos promedio de duración de las intervenciones. El promedio de duración de las jornadas es de 240 minutos, por lo que los porcentajes de duración de las intervenciones programadas con respecto a la duración de las jornadas utilizados son de 12,5%, 25%, 37,5% y 50%.

### ***4.1.3 Número de Jornadas y/o pabellones disponibles***

En algunos casos el número de jornadas y pabellones disponibles depende de la preasignación de horas de pabellón a las especialidades médicas y, en otros casos, de los recursos con que ésta cuenta. En esta tesis se consideró la asignación histórica de

especialidades a pabellones. En la siguiente figura se muestra un ejemplo real de asignación de pabellones a especialidades.

	Pabellón 1	Pabellón 2	Pabellón 3	Pabellón 4	Pabellón 5	Pabellón 6	Pabellón 7	Pabellón 8	Pabellón 9
Lunes Mañana	OTORRINO	URGENCIA	CIRUGÍA	CIRUGÍA	TRAUMATOLOGÍA	CARDIOVASCULAR	CARDIOVASCULAR	PLÁSTICA	NEUROMUSCULARES
Lunes Tarde		URGENCIA		CIRUGÍA			CARDIOVASCULAR	PLÁSTICA	
Martes Mañana	OTORRINO	URGENCIA	CIRUGÍA	CIRUGÍA	QUEMADOS	CARDIOVASCULAR	CARDIOVASCULAR	TRAUMATOLOGÍA	ENDOSCOPIAS
Martes Tarde	OTORRINO	URGENCIA	CIRUGÍA				CARDIOVASCULAR	TRAUMATOLOGÍA	
Miércoles Mañana	OTORRINO	URGENCIA	CIRUGÍA	OFTALMOLOGIA	TRAUMATOLOGÍA	CARDIOVASCULAR	CARDIOVASCULAR	PLÁSTICA	MAXILOFACIAL
Miércoles Tarde		URGENCIA			TRAUMATOLOGÍA		CARDIOVASCULAR	TRAUMATOLOGIA	
Jueves Mañana	MAXILOFACIAL	URGENCIA	CIRUGÍA	CIRUGÍA	PLÁSTICA	OFTAMOLOGIA	CARDIOVASCULAR	NEURO-ORTOPEDIA	MAXILOFACIAL
Jueves Tarde		URGENCIA		CIRUGÍA	PLÁSTICA		CARDIOVASCULAR		
Viernes Mañana	OTORRINO	URGENCIA	CIRUGIA (HERNIAS)	QUEMADOS	TRAUMATOLOGÍA	CARDIOVASCULAR	CARDIOVASCULAR	TRAUMATOLOGÍA	NEUROMUSCULARES
Viernes Tarde	OTORRINO	URGENCIA					CARDIOVASCULAR		

**Tabla 4-1: Asignación de pabellones a especialidades**

En el caso de Plástica y Cirugía General (especialidades en la cual se realizó el estudio) el número de jornadas en que se opera era de 5 y 10 jornadas respectivamente. Por ello, se evaluaron los escenarios con 5 y 10 jornadas, considerando 2 diferentes pabellones en cada caso (pabellones 5 y 8 y pabellones 3 y 4).

#### **4.1.4 Número de Jornadas en las que se pueden programar pacientes**

Un paciente puede ser programado, a priori, en más de una jornada (para que el problema tenga sentido). El número de jornadas en que podría ser programado un paciente depende de varios factores que se presentaron en la sección 4.1.4. Cada paciente tiene un número de jornadas factibles para ser programado. Para estimar el número de jornadas por paciente en las que se podría programar, se consideraron ejemplos reales como los presentados en la sección 7.3.

En un escenario real, las jornadas disponibles de cada paciente dependen de sus características y son diferentes para cada uno. En escenarios restrictivos, el promedio de jornadas disponibles del grupo de pacientes es de 2,5. También, se analizaron algunos casos menos restrictivos donde el número de jornadas disponibles en promedio por paciente es de 4,5. Con esto, se decidió evaluar escenarios en los cuales el número de jornadas por paciente (promedio) fue de 2,5, 3,5 y 4,5.

## 4.2 Escenarios de Prueba

A partir de ejemplos reales en hospitales públicos de Chile se crearon escenarios que incluyen algunas modificaciones que permiten evaluar el comportamiento de los modelos desarrollados. A continuación se muestran las características de los escenarios utilizados:

	Número de Pacientes	Duraciones Promedio	Jornadas Utilizadas	Número de Jornadas
Escenario 1	50	12,5	10	2,5
Escenario 2	100	12,5	10	2,5
Escenario 3	200	12,5	10	2,5
Escenario 4	50	25	10	2,5
Escenario 5	100	25	10	2,5
Escenario 6	200	25	10	2,5
Escenario 7	50	37,5	10	2,5
Escenario 8	100	37,5	10	2,5
Escenario 9	200	37,5	10	2,5
Escenario 10	50	12,5	5	2,5
Escenario 11	100	12,5	5	2,5
Escenario 12	200	12,5	5	2,5
Escenario 13	50	25	5	2,5
Escenario 14	100	25	5	2,5
Escenario 15	200	25	5	2,5
Escenario 16	50	37,5	5	2,5
Escenario 17	100	37,5	5	2,5
Escenario 18	200	37,5	5	2,5
Escenario 19	50	12,5	10	3,5
Escenario 20	100	12,5	10	3,5
Escenario 21	200	12,5	10	3,5
Escenario 22	50	25	10	3,5
Escenario 23	100	25	10	3,5
Escenario 24	200	25	10	3,5
Escenario 25	50	37,5	10	3,5
Escenario 26	100	37,5	10	3,5
Escenario 27	200	37,5	10	3,5
Escenario 28	50	12,5	5	3,5
Escenario 29	100	12,5	5	3,5
Escenario 30	200	12,5	5	3,5
Escenario 31	50	25	5	3,5
Escenario 32	100	25	5	3,5
Escenario 33	200	25	5	3,5
Escenario 34	50	37,5	5	3,5
Escenario 35	100	37,5	5	3,5
Escenario 36	200	37,5	5	3,5
Escenario 37	50	12,5	10	4,5
Escenario 38	100	12,5	10	4,5
Escenario 39	200	12,5	10	4,5
Escenario 40	50	25	10	4,5
Escenario 41	100	25	10	4,5
Escenario 42	200	25	10	4,5
Escenario 43	50	37,5	10	4,5
Escenario 44	100	37,5	10	4,5
Escenario 45	200	37,5	10	4,5
Escenario 46	50	12,5	5	4,5
Escenario 47	100	12,5	5	4,5
Escenario 48	200	12,5	5	4,5
Escenario 49	50	25	5	4,5
Escenario 50	100	25	5	4,5
Escenario 51	200	25	5	4,5
Escenario 52	50	37,5	5	4,5
Escenario 53	100	37,5	5	4,5
Escenario 54	200	37,5	5	4,5
Escenario 55	50	50	10	2,5
Escenario 56	100	50	10	2,5
Escenario 57	200	50	10	2,5
Escenario 58	50	50	5	2,5
Escenario 59	100	50	5	2,5
Escenario 60	200	50	5	2,5
Escenario 61	50	50	10	3,5
Escenario 62	100	50	10	3,5
Escenario 63	200	50	10	3,5
Escenario 64	50	50	5	3,5
Escenario 65	100	50	5	3,5
Escenario 66	200	50	5	3,5
Escenario 67	50	50	10	4,5
Escenario 68	100	50	10	4,5
Escenario 69	200	50	10	4,5
Escenario 70	50	50	5	4,5
Escenario 71	100	50	5	4,5
Escenario 72	200	50	5	4,5

Tabla 4-2: Descripción de Escenarios

### 4.3 Resultados Obtenidos

Para todos los efectos comparativos, los modelos fueron ejecutados en el mismo computador, el cual contó con un procesador AMD Phenom II X4 965 de 3,4GHz y 8 GB de memoria RAM. El algoritmo del tipo *Backtracking* fue programado en Java utilizando la herramienta NetBeans 6.9.1, para la ejecución del programa se le asignó una memoria disponible máxima 6,5 GB. Los otros modelos se ejecutaron en GAMS 23.5. Para el estudio del modelo de programación entera con prioridad modificada se utilizaron dos conjuntos de valores de  $\alpha$  y  $\beta$  (ver sección 3.1.2). Los valores utilizados se muestran en la siguiente tabla.

	$\alpha$	$\beta$
Modelo de programación entera con prioridad modificada 1	2	1
Modelo de programación entera con prioridad modificada 2	5	1

**Tabla 4-3: Valores de  $\alpha$  y  $\beta$  utilizados**

Para presentar los resultados, se separaron los escenarios en dos grupos, los primeros escenarios se basan en el caso de la especialidad de Cirugía General en los pabellones 3 y 4 del Hospital Luis Calvo Mackenna, durante el mes de agosto de 2009. El segundo grupo de escenarios se basa en información real de las especialidades de Plástica en los pabellones 5 y 8 del mismo hospital y el mismo intervalo de tiempo de estudio.

Como se vio en la sección 1.6, los resultados de los modelos pueden ser evaluados en dos categorías. La primera, es el desempeño computacional donde destaca el tiempo de ejecución del modelo. La segunda categoría, tiene que ver con características propias del problema. Es decir, el porcentaje de utilización del pabellón logrado con cada uno de los modelos y los escenarios y el respeto de la prioridad, definido en la sección 1.6.2.2.

### ***4.3.1 Tiempos de ejecución***

Una de los resultados más interesantes de analizar es el tiempo que tarda cada modelo en entregar una solución. Esto es debido a que la generación de estos modelos obliga a que los tiempos de ejecución sean adecuados a la aplicación rutinaria de los mismos. Como se describió en la sección 1.6.1.1, tiempos de ejecución superiores a 15 minutos no son adecuados para soluciones factibles de ser implementadas en los hospitales investigados.

A continuación se presentan algunos resultados obtenidos que fueron clasificados para poder entregar la mayor cantidad de información posible.

#### **4.3.1.1 Algoritmo del Tipo *Backtracking***

El algoritmo del tipo *Backtracking* presentó problemas en algunas de las pruebas realizadas. Estos problemas se deben al alto consumo de memoria RAM que requiere para la ejecución del modelo bajo escenarios donde existen muchas combinaciones factibles. El número de combinaciones factibles está dado, principalmente por la duración porcentual de las intervenciones en función de la duración de las jornadas y del número de jornadas disponibles a priori para cada paciente. Como se muestra a continuación, los resultados fueron ordenados para hacer más explícito este efecto.

En los escenarios donde no se logró obtener el resultado, no se especificó el tiempo de ejecución.



**Figura 4-1: Tiempos de ejecución del algoritmo del tipo *Backtracking* para el primer grupo de escenarios**



**Figura 4-2: Tiempos de ejecución del algoritmo del tipo *Backtracking* para el segundo grupo de escenarios**

En los gráficos los escenarios se muestran ordenados de la siguiente manera: para cada escenario se muestra el número de pacientes del modelo, la duración porcentual de todas las intervenciones y la cantidad de jornadas promedio en las que cada paciente puede ser

intervenido. Por ejemplo, el primer escenario de estos gráficos tiene las siguientes características:

Número de pacientes	50
Duración de la intervención (Promedio con respecto a la duración de las jornadas)	12,5
Número de Jornadas por paciente (Promedio)	2,5

**Tabla 4-4: Ejemplo primer Escenario graficado**

En ambos gráficos, es posible observar que el algoritmo del tipo *Backtracking* puede finalizar sólo si la cantidad de jornadas promedio en las que cada paciente puede ser intervenido y la duración de éstas, limitan el número de combinaciones factibles totales. Es importante considerar que depende del número de jornadas en las cuales se puede operar, ya que los resultados entre ambos grupos de escenarios son diferentes, siendo menor para el caso de 10 jornadas. Se observa que el resultado es independiente del número de pacientes y que los tiempos de ejecución no superan los 2 segundos en los casos que se logra obtener el resultado.

#### **4.3.1.2 Modelo de programación entera y su variante**

Como se mostró en la sección 3.1.1.5 el modelo de programación entera puede ser planteado de 2 formas diferentes. A continuación se presentan los resultados de las pruebas realizadas a ambos modelos.









**Figura 4-7: Tiempos de ejecución del modelo de programación entera con asignación independiente (MPE AI) para el primer grupo de escenarios**



**Figura 4-8: Tiempos de ejecución del modelo de programación entera con asignación independiente (MPE AI) para el segundo grupo de escenarios**

Es fácil observar en los gráficos anteriores que el modelo de programación entera con asignación independiente depende fuertemente del número de pacientes, siendo relativamente constante para un número determinado de pacientes. El crecimiento en el tiempo de ejecución por el aumento en el número de pacientes no es lineal.

#### 4.3.1.5 Comparativa de modelos según resultados

Es posible observar que el modelo de programación entera con asignación independiente tarda mucho más tiempo en entregar el resultado bajo cualquier escenario. A continuación se muestran los tiempos de ejecución promedio en los escenarios estudiados en una tabla resumen.

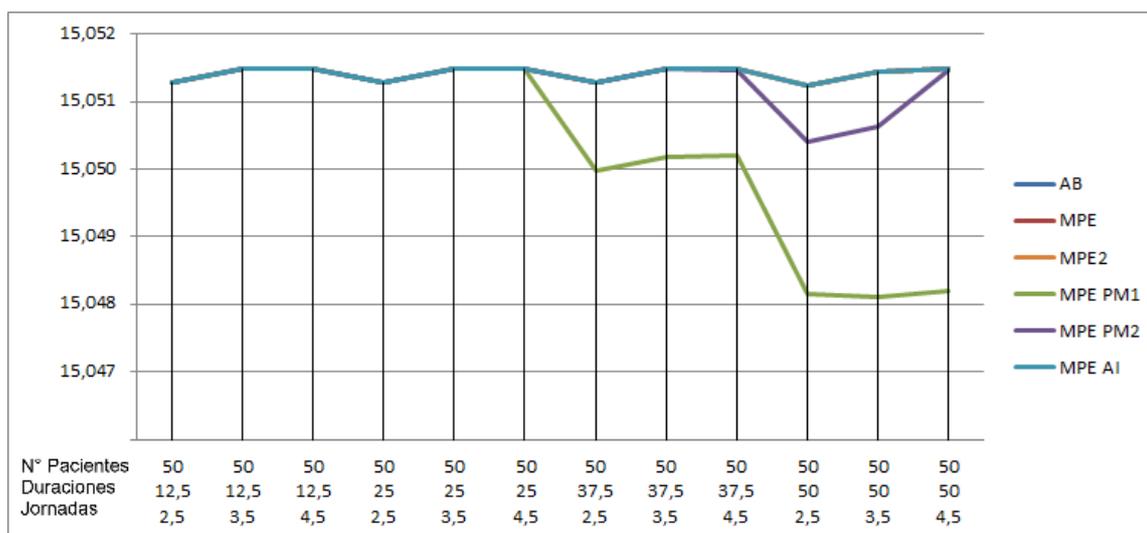
	N° de pacientes	AB	MPE	MPE2	MPE PM	MPE AI
Grupo 1	50	0:04	0:07	0:07	0:08	6:01
Grupo 2		0:01	0:12	0:11	0:13	10:35
Grupo 1	100	0:04	0:15	0:14	0:15	23:31
Grupo 2		0:01	0:24	0:23	0:24	41:55
Grupo 1	200	0:07	0:28	0:23	0:29	97:18
Grupo 2		0:01	0:47	0:43	0:48	173:38

**Tabla 4-5: Resumen de tiempos de ejecución promedio (en minutos) por modelo y número de pacientes**

#### 4.3.2 Respeto de la prioridad

Como se explicó en la sección 1.6.2.2, la calidad del resultado depende del respeto de la prioridad de los pacientes asignados en las soluciones entregadas por cada modelo. Ésta puede ser medida de distintas maneras, como se explicó anteriormente. Sin embargo, para esta parte del estudio, se utilizó para el análisis de la prioridad los valores obtenidos en cada resultado mediante el Indicador de calidad de la asignación desde el punto de vista de la prioridad o  $IC_A$ . Los valores de los  $IC_A$  de todos los escenarios obtenidos se encuentran en la sección 7.4.

A continuación se presenta el gráfico que representa el respeto de la prioridad mediante el Indicador de calidad de la asignación desde el punto de vista de la prioridad de los modelos desarrollados, para el primer grupo de escenarios, considerando 50 pacientes:

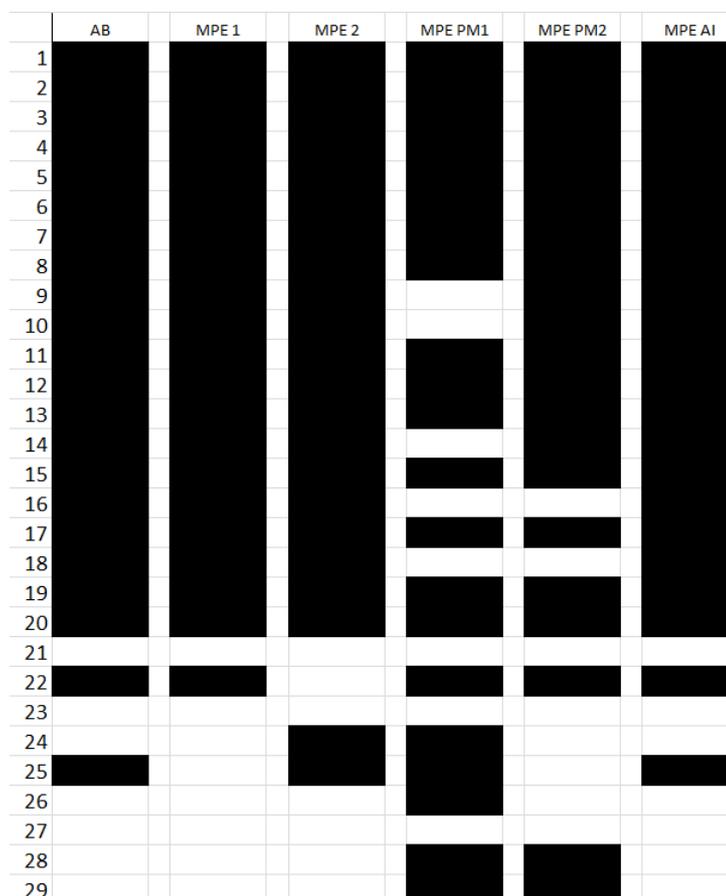


**Figura 4-9: Respeto de la prioridad del primer grupo de escenarios para 50 pacientes**

Aquí se observa que en los escenarios con mayores duraciones porcentuales de las intervenciones en función de las duraciones de las jornadas, el modelo de programación entera con prioridad modificada 2 entregó mejores resultados que los del modelo de programación entera con prioridad modificada 1. Esto es muy relevante, ya que permite inferir que buenos valores de  $\alpha$  y  $\beta$  en algunos casos no siempre son los mejores en otros casos. Es posible observar que la variante del modelo de programación entera entrega resultados muy similares, desde el punto de vista de la prioridad, que el modelo de programación matemática entera. Esto se repite prácticamente en todos los análisis de cada grupo de escenarios, considerando la misma cantidad de pacientes.

Resulta interesante observar un ejemplo donde se detalla la asignación de pacientes determinada por cada modelo. Al igual que en la sección 3.1.2 se muestra para los primeros pacientes asignados, los resultados de los modelos desarrollados en el escenario del primer

grupo, considerando 50 pacientes, duraciones de intervenciones promedio del 37,5% de la duraciones de las jornadas y jornadas disponibles a priori de 3,5 promedio por paciente.

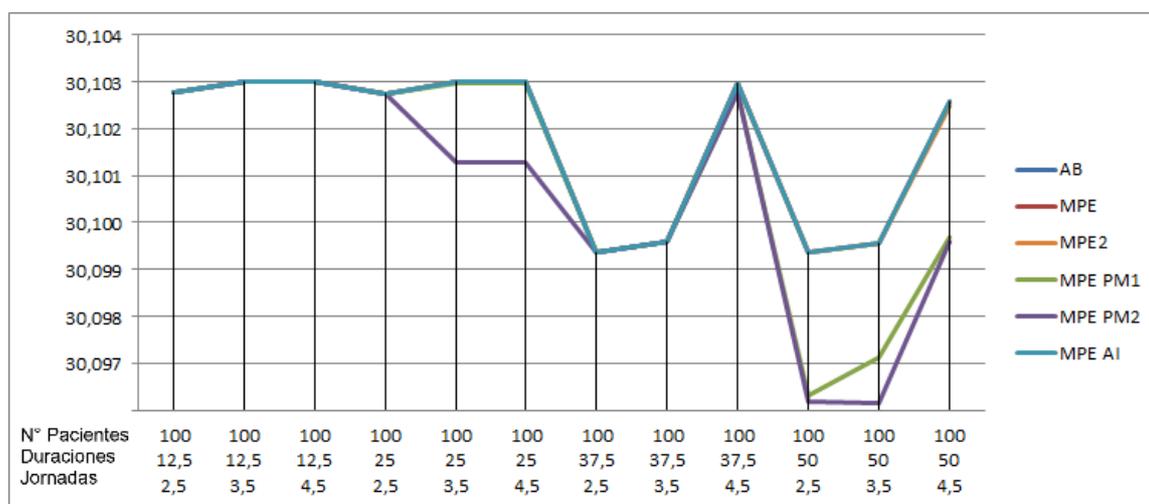


**Figura 4-10: Detalle de la asignación de los primeros 29 pacientes del escenario del primer grupo, con 50 pacientes, duraciones de intervenciones promedio del 37,5% y jornadas disponibles de 3,5**

Aquí se observa que el algoritmo del tipo *Backtracking* entregó los mismos resultados, desde el punto de vista del respeto a la prioridad que el modelo de programación entera con asignación independiente, y muy parecido a los resultados del modelo de programación entera. Este resultado fue mejor en todos estos escenarios respecto de los resultados de los modelos enteros con prioridad modificada. La variante del modelo de programación entera entregó un

resultado similar al del modelo de programación entera, pero de menor calidad en los pacientes menos prioritarios que fueron asignados.

El siguiente gráfico muestra el respeto de la prioridad de los modelos desarrollados, para el primer grupo de escenarios considerando 100 pacientes:



**Figura 4-11: Respeto de la prioridad del primer grupo de escenarios para 100 pacientes**

En este gráfico se observa, al igual que en el caso anterior, que el algoritmo del tipo *Backtracking* entregó los mismos resultados, desde el punto de vista del respeto a la prioridad, que el modelo de programación entera con asignación independiente y el modelo de programación entera. Este resultado fue mejor, en todos estos escenarios que los resultados obtenidos por los modelos de programación entera con prioridad modificada.

A diferencia del conjunto de escenarios anterior, en este gráfico se observa que el modelo de programación entera con prioridad modificada 1 resultó ser mejor desde el punto de vista de la prioridad que los resultados del modelo de programación entera con prioridad modificada 2. En la sección 3.1.2 se estimaron los mejores valores de  $\alpha$  y  $\beta$  que permitían entregar los mejores resultados desde el punto de vista de la prioridad. El resultado en este caso refleja lo determinado en esta estimación.

Un ejemplo donde se detalla la asignación de pacientes determinada por cada modelo que resulta interesante de detallar, es el que considera 100 pacientes, duraciones de intervenciones promedio de 50% de las duraciones de las jornadas y jornadas disponibles a priori de 2,5 promedio por paciente.

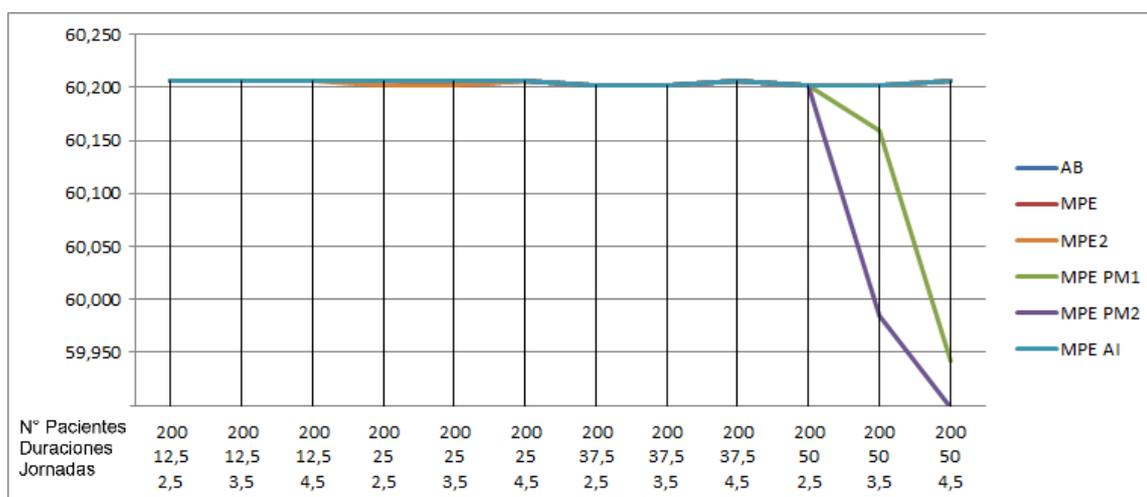
	AB	MPE 1	MPE 2	MPE PM1	MPE PM2	MPE A1
1	█	█	█	█	█	█
2	█	█	█	█	█	█
3	█	█	█	█	█	█
4	█	█	█	█	█	█
5	█	█	█	█	█	█
6	█	█	█	█	█	█
7	█	█	█	█	█	█
8	█	█	█	█	█	█
9	█	█	█	█	█	█
10	█	█	█	█	█	█
11	█	█	█	█	█	█
12	█	█	█	█	█	█
13	█	█	█	█	█	█
14	█	█	█	█	█	█
15	█	█	█	█	█	█
16	█	█	█	█	█	█
17	█	█	█	█	█	█
18	█	█	█	█	█	█
19	█	█	█	█	█	█
20	█	█	█	█	█	█
21	█	█	█	█	█	█
22	█	█	█	█	█	█
23						
24						
25						
26						

**Figura 4-12: Detalle de la asignación de los primeros 26 pacientes del escenario del primer grupo, con 100 pacientes, duraciones de intervenciones promedio del 50% y jornadas disponibles de 2,5**

En esta figura se observa, a diferencia del caso anterior, que el modelo de programación entera con prioridad modificada 1 resultó ser mejor desde el punto de vista de la prioridad que los resultados del modelo de programación entera con prioridad modificada 2. En este caso, los modelos de programación entera y los modelos programación entera con

asignación independiente entregaron exactamente el mismo resultado que el algoritmo del tipo *Backtracking*.

A continuación se muestra el gráfico que representa el respeto de la prioridad de los modelos desarrollados para el primer grupo de escenarios considerando 200 pacientes:



**Figura 4-13: Respeto de la prioridad del primer grupo de escenarios para 200 pacientes**

Al igual que en el caso anterior, los resultados del modelo de programación entera con prioridad modificada 1 resultaron ser mejor desde el punto de vista de la prioridad que los resultados del modelo de programación entera con prioridad modificada 2. En todos los escenarios de este grupo se observa que el modelo de programación entera con asignación independiente y el algoritmo del tipo *Backtracking* entregaron el mejor resultado de asignación de pacientes prioritarios.

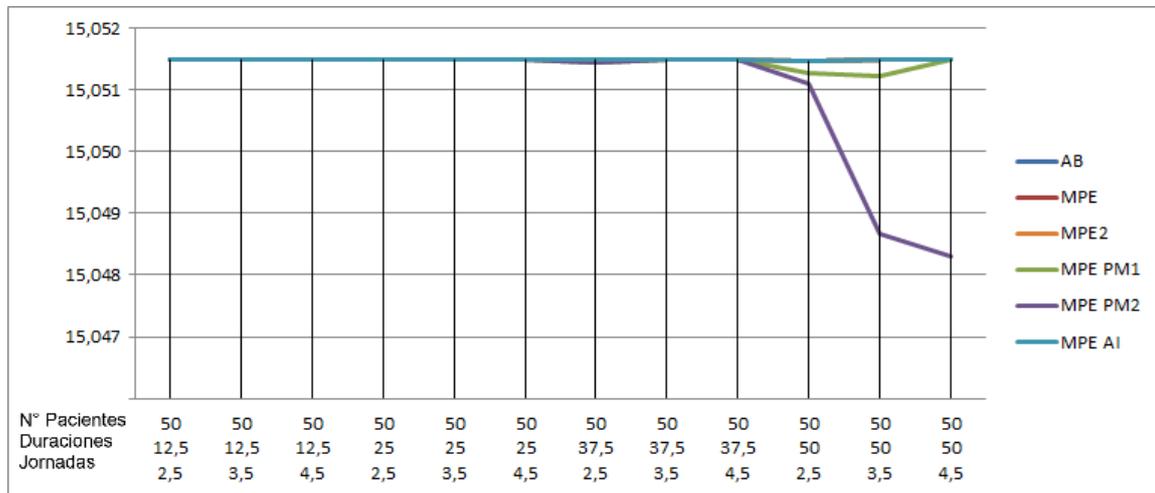
En este caso, parece interesante observar las asignaciones de los modelos en el escenario cuando las duraciones de intervenciones promedio se tomaron de 50% de las duraciones de las jornadas y jornadas disponibles a priori de 3,5 promedio por paciente.

	AB	MPE 1	MPE 2	MPE PM1	MPE PM2	MPE AI
1	■	■	■	■	■	■
2	■	■	■	■	■	■
3	■	■	■	■	■	■
4	■	■	■	■	■	■
5	■	■	■	■	■	■
6	■	■	■	■	■	■
7	■	■	■	■	■	■
8	■	■	■	■	■	■
9	■	■	■	■	■	■
10	■	■	■	■	■	■
11	■	■	■	■	■	■
12	■	■	■	■	■	■
13	■	■	■	■	■	■
14	■	■	■	■	■	■
15	■	■	■	■	■	■
16	■	■	■	■	■	■
17	■	■	■	■	■	■
18	■	■	■	■	■	■
19	■	■	■	■	■	■
20	■	■	■	■	■	■
21	■	■	■	■	■	■

**Figura 4-14: Detalle de la asignación de los primeros 21 pacientes del escenario del primer grupo, con 200 pacientes, duraciones de intervenciones promedio del 50% y jornadas disponibles de 3,5**

Aquí se observa que las asignaciones de los dos modelos de programación entera con prioridad modificada entregaron resultados de peor calidad desde el punto de vista de la prioridad. También, es posible observar que el modelo programación entera con asignación independiente entregó el mismo resultado que el algoritmo del tipo *Backtracking* y, que el modelo de programación entera y su variante entregaron los mismos resultados.

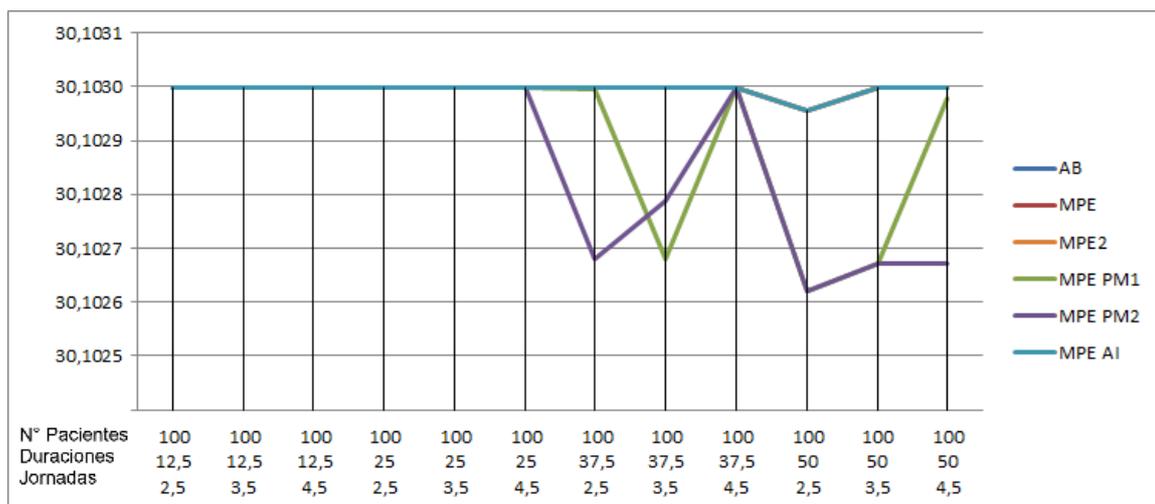
A continuación se muestra el gráfico de los resultados de los indicadores de calidad de la asignación desde el punto de vista de la prioridad para los escenarios del segundo grupo considerando 50 pacientes:



**Figura 4-15: Respeto de la prioridad del segundo grupo de escenarios para 50 pacientes**

Aquí se observa que los resultados del modelo de programación entera con prioridad modificada 1 resultaron ser mejor desde el punto de vista de la prioridad que los resultados del modelo de programación entera con prioridad modificada 2.

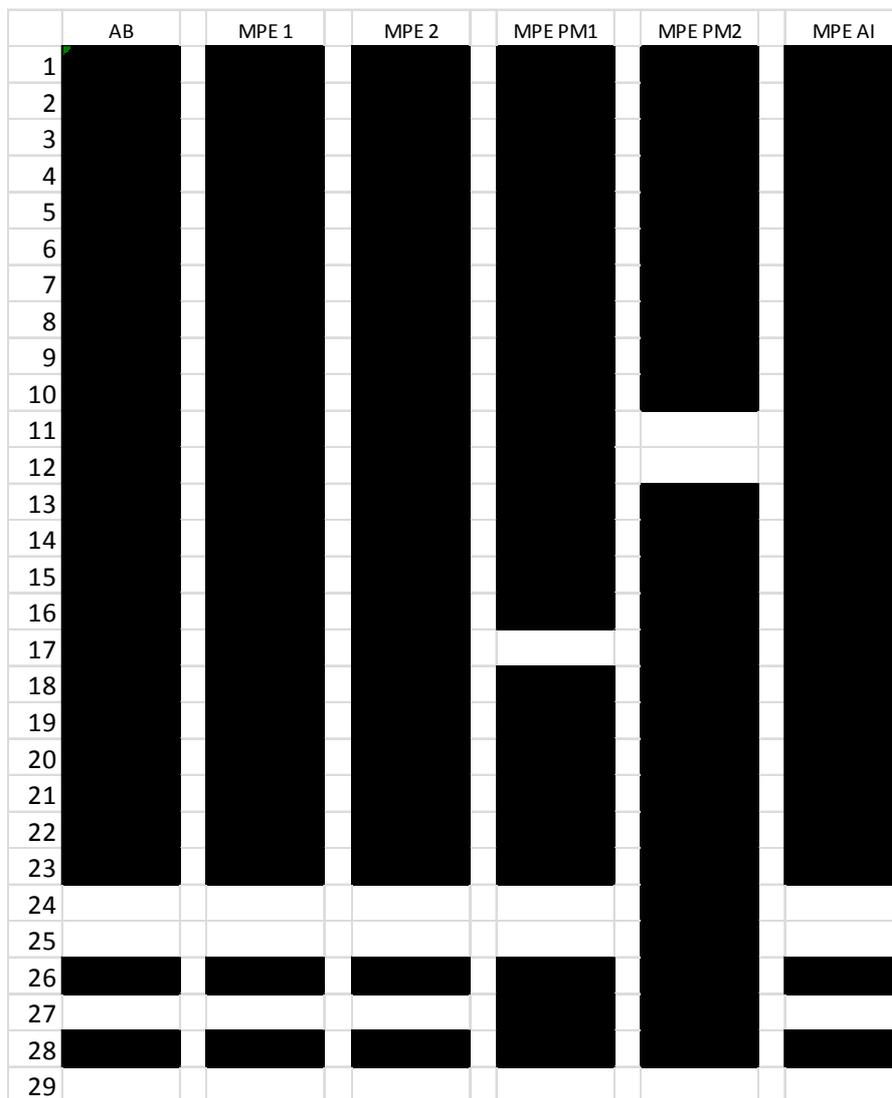
A continuación se presenta el gráfico que representa el respeto de la prioridad de los modelos desarrollados, utilizando el indicador de calidad de asignación presentado en la sección 1.6.2.2, considerando 100 pacientes:



**Figura 4-16: Respeto de la prioridad del segundo grupo de escenarios para 100 pacientes**

En los 3 últimos gráficos se observa que el modelo de programación entera con prioridad modificada 1 resultó ser mejor, desde el punto de vista de la prioridad, que los resultados del modelo de programación entera con prioridad modificada 2. Esto es consistente con lo obtenido en la sección 3.1.2. Sin embargo, aquí es posible observar que en algunos casos el modelo de programación entera con prioridad modificada 1 entrega un peor resultado que el modelo de programación entera con prioridad modificada 2. Esto permite mostrar que la elección de  $\alpha$  y  $\beta$  depende del escenario, ya que en algunos casos una combinación de  $\alpha$  y  $\beta$  puede entregar el mejor resultado y en otros escenarios no.

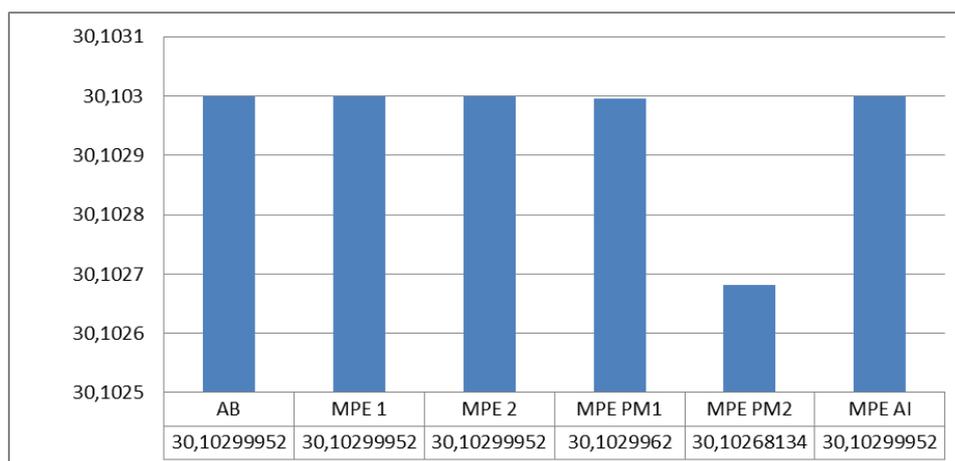
Otro ejemplo que resulta interesante observar, donde se detalla la asignación de pacientes determinada por cada modelo es el ejemplo real de las especialidades de Cirugía del HLCM en agosto del 2009. Aquí se muestra para los primeros 29 pacientes asignados, los resultados de los modelos desarrollados en el escenario del segundo grupo, considerando 100 pacientes, duraciones de intervenciones promedio del 37,5% de la duraciones de las jornadas y jornadas disponibles, a priori de 2,5 promedio por paciente:



**Figura 4-17: Detalle de la asignación de los primeros 29 pacientes del escenario del segundo grupo, con 100 pacientes, duraciones de intervenciones promedio del 37,5% y jornadas disponibles de 2,5**

Aquí se observa que el comportamiento del modelo entero con prioridad modificada 1 resultó mejor que el 2 y que los otros modelos entregaron las mismas asignaciones de pacientes.

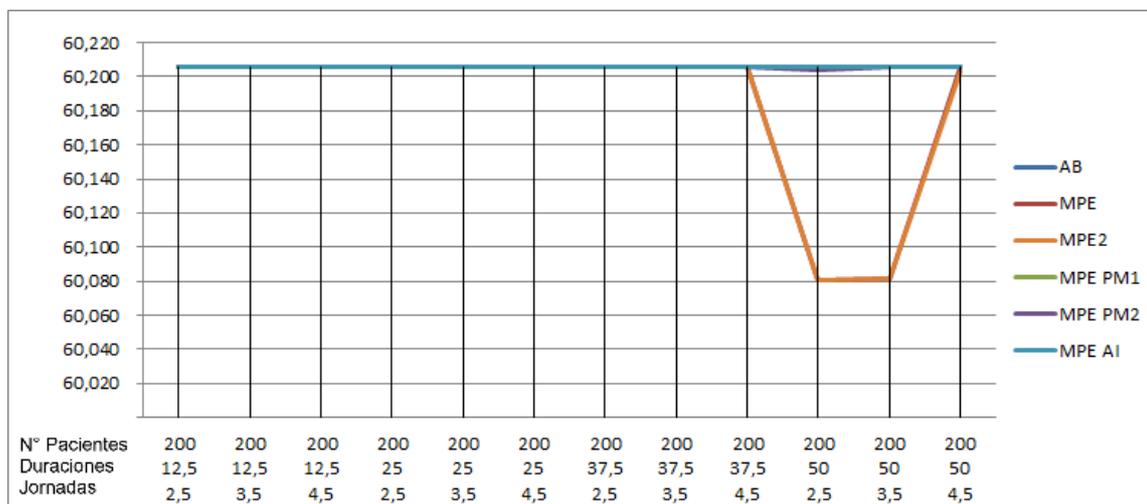
En el siguiente gráfico se muestra, para este caso el análisis de la prioridad utilizando los valores obtenidos mediante el Indicador de calidad de la asignación desde el punto de vista de la prioridad.



**Figura 4-18: Valores obtenidos del Indicador de calidad de la asignación desde el punto de vista de la prioridad para el escenario del segundo grupo, con 100 pacientes, duraciones de intervenciones promedio del 37,5% y jornadas disponibles de 2,5**

Es posible observar que el mecanismo utilizado para evaluar la calidad de las programaciones desde el punto de vista de la prioridad es adecuado, ya que entregó un valor menor para la solución dada por el modelo entero con prioridad modificada 2 en comparación a las otras soluciones.

Finalmente, se muestra el resultado de los modelos para los escenarios del segundo grupo, con 200 pacientes:



**Figura 4-19: Respeto de la prioridad del segundo grupo de escenarios para 200 pacientes**

En este gráfico se observa que los resultados del modelo de programación entera y su variante con 200 pacientes, 10 jornadas disponibles y duraciones de intervenciones en promedio 50% la duración de las jornadas resultaron no ser el óptimo, desde el punto de vista del respeto de la prioridad.

Resulta interesante observar un ejemplo donde se detalla la asignación de pacientes determinada por cada modelo. Al igual que en la sección 3.1.2 se muestra para los primeros pacientes asignados, los resultados de los modelos desarrollados en el escenario del segundo grupo, considerando 200 pacientes, duraciones de intervenciones promedio del 50% de la duraciones de las jornadas y jornadas disponibles a priori de 2,5 promedio por paciente.

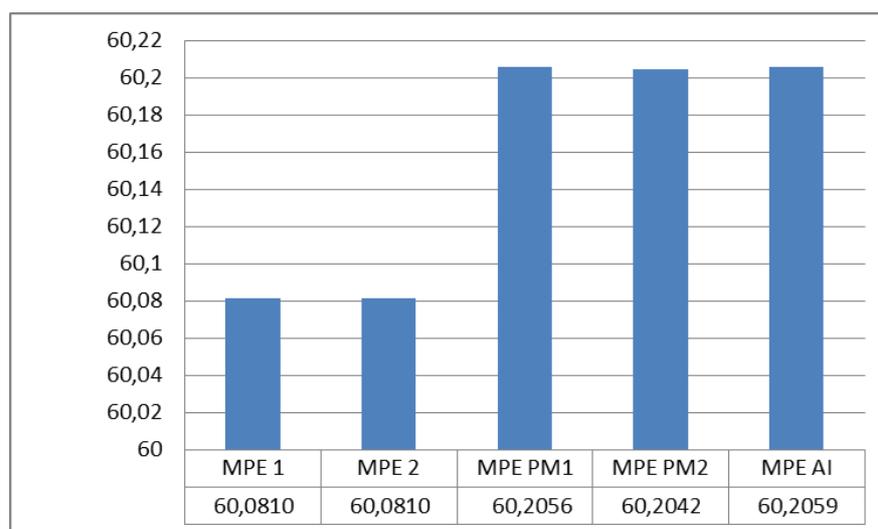
	MPE 1	MPE 2	MPE PM1	MPE PM2	MPE AI
1	█	█	█	█	█
2					
3	█	█	█	█	█
4	█	█	█	█	█
5	█	█	█	█	█
6	█	█	█	█	█
7	█	█	█	█	█
8	█	█	█	█	█
9	█	█	█	█	█
10	█	█	█	█	█
11	█	█	█	█	█
12	█	█	█	█	█
13	█	█	█	█	█
14			█	█	
15	█	█	█	█	
16					█
17	█	█	█	█	
18					
19	█	█	█	█	█
20					
21	█	█	█	█	█
22	█	█	█	█	█
23					
24			█	█	█
25					
26					

**Figura 4-20: Detalle de la asignación de los primeros 26 pacientes del escenario del segundo grupo, con 200 pacientes, duraciones de intervenciones promedio del 50% y jornadas disponibles de 2,5**

Aquí se observa que el modelo de programación entera y su variante no asignaron al segundo paciente, lo que significó un resultado deficiente en comparación a los otros resultados, considerando el respeto de la prioridad relativa de pacientes. También, se observa que el resultado del modelo de programación entera con prioridad modificada 1 resultó mejor desde el punto de vista de la prioridad que el resultado del modelo de programación entera con prioridad modificada 2, ya que el primer paciente no asignado del resultado del modelo de

programación entera con prioridad modificada 2 es el paciente 8 y no el 11 como en el resultado del modelo de programación entera con prioridad modificada 1.

En el siguiente gráfico se muestra, para este caso el análisis de la prioridad utilizando los valores obtenidos mediante el Indicador de calidad de la asignación desde el punto de vista de la prioridad.



**Figura 4-21: Valores obtenidos del Indicador de calidad de la asignación desde el punto de vista de la prioridad para el escenario del segundo grupo, con 200 pacientes, duraciones de intervenciones promedio del 50% y jornadas disponibles de 2,5**

Aquí es posible observar que incluso variaciones en los decimales de los valores obtenidos mediante el Indicador de calidad de la asignación desde el punto de vista de la prioridad son relevantes en el respeto de la prioridad de las diferentes asignaciones.

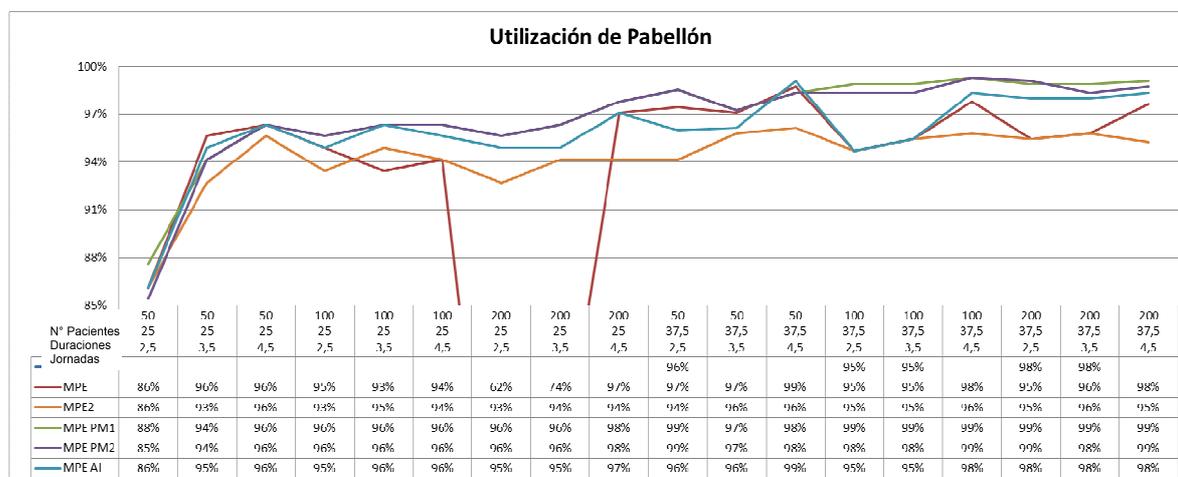
### 4.3.3 Utilización de Pabellón

Los modelos estudiados tienen distintas capacidades de minimizar el tiempo ocioso de cada pabellón, mediante combinaciones de asignación de pacientes. La utilización de pabellón se determina como el porcentaje de tiempo asignado con respecto a la cantidad de minutos



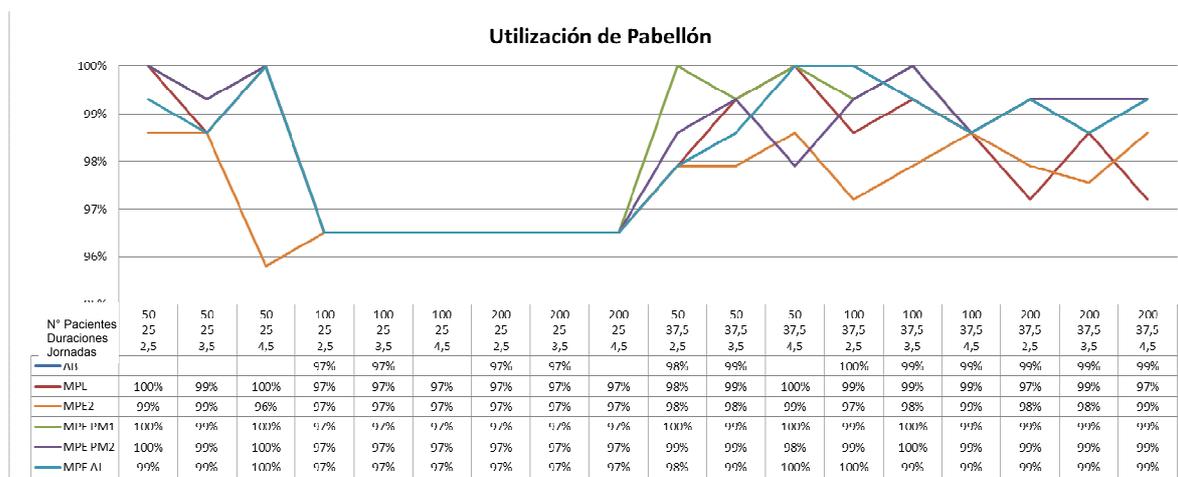
Al ordenarlos de esta forma se observa que en los extremos se obtienen los peores resultados, cuando las duraciones de las intervenciones son muy cortas en comparación a las duraciones de la jornadas (12,5%) y son pocos los pacientes que se desean programar. La asignación máxima de pacientes no logra cubrir un porcentaje de las jornadas disponibles, por esto en estos casos se obtienen bajas tasas de utilización de pabellón. Por otro lado, cuando las duraciones de las intervenciones son cercanas a la mitad de la duración de las jornadas, disminuyen las combinaciones que permiten obtener buenos resultados en la utilización de pabellón.

Resulta interesante ver en detalle lo que ocurre cuando las intervenciones tienen duraciones mayores al 12,5% y menores al 50%. Para esto, se presenta el siguiente gráfico donde es posible observar el comportamiento de los modelos en cuanto a la utilización de pabellón.



**Figura 4-24: Detalle de la utilización de pabellón del primer grupo de escenarios**

En este caso, se graficó entre el 85% y el 100% para poder observar de mejor manera la diferencia entre los resultados entregados por los distintos modelos estudiados.



**Figura 4-25: Detalle de la utilización de pabellón del segundo grupo de escenarios**

En este caso se graficó entre el 95% y el 100% a diferencia del caso anterior. Esto permite observar de mejor manera la diferencia entre los resultados entregados por los modelos en el segundo grupo de escenarios.

En el primer grupo de escenarios es posible observar que, desde el punto de vista de la utilización los modelos de programación entera con prioridades modificadas entregan, en la mayoría de los casos, mejores resultados porcentuales. Desde el punto de vista de la utilización, los resultados del algoritmo del tipo *Backtracking*, son idénticos a los entregados por el modelo de programación entera con asignación independiente.

En algunos escenarios, se observa que el modelo de programación entera con prioridad modificada 1 es mejor que el modelo de programación entera con prioridad modificada 2 y en otros casos ocurre lo contrario. Desde el punto de vista de la utilización de pabellón, en la mayoría de los casos se observa que el modelo de programación entera con prioridad modificada 2 entrega mejores resultados. La variante del modelo de programación entera entrega resultados peores que todos los otros modelos, en la mayoría de los escenarios estudiados.

## 4.4 Resumen de los resultados obtenidos

A continuación se presenta un resumen de los resultados en todos los escenarios desde el punto de vista de cada modelo y una justificación de estos.

### 4.4.1 Resultados del algoritmo del tipo *Backtracking*

El algoritmo del tipo *Backtracking* presenta una solución que es bastante rápida (cercano al segundo) en comparación al resto de los modelos estudiados. Sin embargo, para casos donde existen muchas soluciones factibles el cálculo presenta serias dificultades. Esto se debe principalmente al uso de la memoria RAM asignada. En este sentido existen dos casos: el primero, en el cual el número de combinaciones factibles no supera el máximo de la memoria RAM asignada; el segundo, corresponde a escenarios en los cuales el número de combinaciones sobrepasa el máximo de memoria RAM asignada.

Como se observa en la siguiente figura, si el número de combinaciones (o de rutas) es bajo (en relación a lo que permite la memoria RAM), entonces el resultado es entregado muy rápidamente. En caso contrario, no es posible obtener una solución.

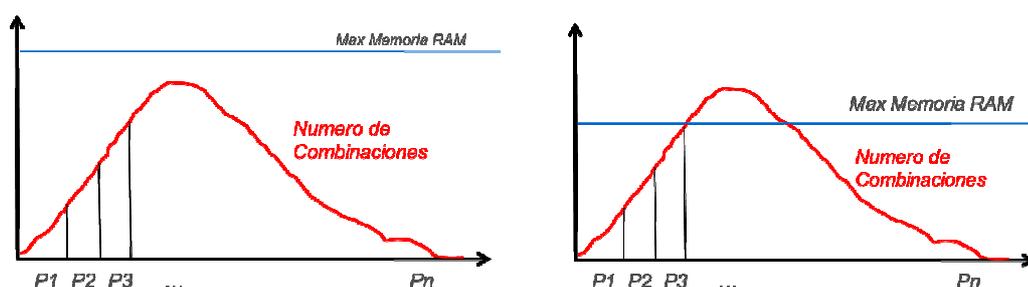


Figura 4-26: Problemas del algoritmo del tipo *Backtracking*

Con respecto al respeto de la prioridad, el algoritmo del tipo *Backtracking* entregó los mismos resultados que el modelo de programación entera con asignación independiente, que por construcción entrega el mejor resultado, desde el punto de vista de la prioridad. Con

respecto a la utilización de pabellón, el resultado entregado por el método depende de las características de duración de las intervenciones de los pacientes más prioritarios.

#### ***4.4.2 Resultados del modelo de programación entera y su variante***

Desde el punto de vista del tiempo de ejecución, el modelo de programación entera cumple con los requerimientos de ser implementado en una solución real, al ser en todos los casos, ejecutado en tiempos menores al tiempo máximo estimado para entregar la solución. Si bien, los tiempos de ejecución son menores en todos los escenarios estudiados que los tiempos del modelo de programación entera con asignación independiente, este modelo tarda algunos segundos más que el algoritmo del tipo *Backtracking*.

El principal problema de este modelo es la prioridad, el que se debe a la definición biomédica de prioridad. Ésta es definida como “es mejor operar al más urgente aunque esto signifique no poder operar al resto”, esto lleva a que crezca exponencialmente el peso de cada paciente y se tenga para el valor del primer paciente el siguiente valor:

$$PRI_{p=1} = 2^{n-1} \tag{4.1}$$

Por ejemplo, para un caso real el número de pacientes puede ser 100, lo que se traduce en tener un elemento  $2^{99}$  en la función objetivo. Éste es un número muy grande y difícil de manejar, lo que perjudica la solución, debido a la precisión limitada de los paquetes de optimización.

En la mayoría de los casos, la solución entregada por el modelo de programación entera y su variante fue la misma. La variante presenta problemas en escenarios donde se utilizan todos los sobrepasos horarios permitidos. Esto es debido a que sólo se permitió la mitad de los sobrepasos. Los problemas de la prioridad del modelo de programación entera, descritos anteriormente, se mantienen para su variante.

#### ***4.4.3 Resultados del modelo de programación entera con prioridad modificada***

Este modelo, desde el punto de vista del tiempo de ejecución cumple con los requerimientos de ser implementado en una solución real, al ser en todos los casos menores al tiempo máximo estimado para entregar la solución.

Desde el punto de vista de la utilización de pabellón, este método muestra mejores resultados porcentuales en comparación a los otros modelos. Esto es debido a que la asignación de pacientes no respeta en algunos casos la prioridad relativa de pacientes, privilegiando la utilización del pabellón

Este modelo presenta algunos problemas en lo que refiere al respeto de la prioridad. Si bien, el valor que toma  $w_p$ , que es determinado de la siguiente manera:

$$w_p = \alpha^{CAT_p} \cdot t_{Qx}^{\beta} \quad (4.2)$$

puede ser modificado o ajustado mediante los valores de  $\alpha$  y/o  $\beta$ , esto hace que sea muy poco versátil frente a una implementación rutinaria, ya que en una misma implementación un escenario podría cambiar mucho de una semana a otra y el usuario tendrá que ajustar los parámetros para lograr buenos resultados. Esto se observa en los resultados obtenidos por los modelos bajo distintos escenarios en los cuales combinaciones de  $\alpha$  y  $\beta$  presentan buenos resultados en algunos casos y en otros casos distintas combinaciones presentan mejores resultados.

#### 4.4.4 Resultados del modelo de programación entera con asignación independiente

El problema del modelo de programación entera con asignación independiente es su tiempo de ejecución, debido a que se ejecuta el modelo de factibilidad tantas veces como pacientes sean ingresados en cada escenario.

Desde el punto de vista de la calidad del resultado, es fácil determinar que ésta siempre entrega el mejor resultado, desde el punto de vista del respeto de la prioridad, pero los tiempos de ejecución se escapan por mucho a los máximos permitidos en una implementación rutinaria.

#### 4.5 Resultados obtenidos en los casos reales

Por razones de confidencialidad de la información del hospital, la información aquí mostrada no contiene datos que permitan identificar a los pacientes. Los casos reales estudiados corresponden a lo ocurrido la segunda semana de Agosto del 2009 en el Hospital Luis Calvo Mackenna. Los datos disponibles por el hospital se detallan en la sección 7.3. Lo que ocurrió en la realidad es lo que se detalla en la siguiente tabla. En ella, es posible observar los tiempos totales ocupados cada día.

Pabellon 3				
Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Paciente 1	305 Paciente 7	270 Paciente 15	270 Paciente 18	230
Paciente 2		Paciente 16	Paciente 19	
		Paciente 17	Paciente 20	
Tarde	Tarde	Tarde	Tarde	Tarde
	Paciente 8	165		
	Paciente 9			
	Paciente 10			
Pabellon 4				
Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Paciente 3	275 Paciente 11	185	Paciente 21	330
Paciente 4	Paciente 12		Paciente 22	
Paciente 5	Paciente 13			
	Paciente 14			
Tarde	Tarde	Tarde	Tarde	Tarde
Paciente 6	95		Paciente 23	60

Tabla 4-6: Programación de pabellones en el caso real

Es importante destacar que las duraciones de las intervenciones de los pacientes utilizadas para la programación no son las mismas que las que se usaron para evaluar los resultados de esta sección.

A continuación, se muestra la tabla quirúrgica para la misma semana si se hubiese utilizado la programación de pabellones propuesta por el algoritmo del tipo *Backtracking*, el modelo de programación entera y el modelo de programación entera con prioridad modificada (para este caso los 3 modelos entregaron la misma solución). En esta tabla, también se adjunta el médico que fue asignado. Para la programación se consideró que el primer médico que en realidad opero al paciente se asignara para éste y que los pacientes que fueron los primeros en su día sean los primeros en los días programados.

Pabellón 3				
Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Paciente: 1; Doctor1: 1, Doctor2: 4, Paciente: 2; Doctor1: 1, Doctor2: 14	305 Paciente: 7; Doctor1: 3, Doctor2: 10, Paciente: 4; Doctor1: 3, Doctor2: 10	285 Paciente: 15; Doctor1: 7, Doctor2: 8, Paciente: 16; Doctor1: 7, Doctor2: 8, Paciente: 17; Doctor1: 8, Doctor2: 4	270 Paciente: 18; Doctor1: 2, Doctor2: 4, Paciente: 8; Doctor1: 5, Doctor2: 2, Paciente: 53; Doctor1: 5, Doctor2: 2, Paciente: 20; Doctor1: 2, Doctor2: 4	280
Tarde	Tarde	Tarde	Tarde	Tarde
	Paciente: 31; Doctor1: 10, Doctor2: 13, Paciente: 30; Doctor1: 10, Doctor2: 13	115		
Pabellón 4				
Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Paciente: 3; Doctor1: 3, Doctor2: 5, Paciente: 9; Doctor1: 5, Doctor2: 3, Paciente: 10; Doctor1: 5, Doctor2: 3	320 Paciente: 11; Doctor1: 6, Doctor2: 13, Paciente: 19; Doctor1: 6, Doctor2: 13, Paciente: 13; Doctor1: 6, Doctor2: 13, Paciente: 12; Doctor1: 6, Doctor2: 13, Paciente: 14; Doctor1: 6, Doctor2: 13	265	Paciente: 21; Doctor1: 9, Doctor2: 10, Paciente: 23; Doctor1: 9, Doctor2: 10, Paciente: 34; Doctor1: 10, Doctor2: 9	250
Tarde	Tarde	Tarde	Tarde	Tarde
Paciente: 6; Doctor1: 3, Doctor2: 5, Paciente: 28; Doctor1: 3, Doctor2: 5, Paciente: 5; Doctor1: 3, Doctor2: 5	195		Paciente: 22; Doctor1: 9, Doctor2: 10	170

**Tabla 4-7: Programación de pabellones utilizando los modelos propuestos con los mismos médicos asignados y conservando el primer paciente**

Este escenario corresponde al de 100 pacientes, 10 jornadas disponibles, duraciones de intervenciones promedio del 37.5% de la duraciones de las jornadas y jornadas disponibles a priori de 2,5 promedio por paciente.

En la siguiente tabla se muestra la tabla quirúrgica para la misma semana si se hubiese utilizado la programación de pabellones propuesta por los métodos señalados anteriormente. En este caso, en la programación no se consideró que el primer médico que en realidad opero al paciente se asignara para éste.

Pabellón 3				
Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Paciente: 2; Doctor1: 1, Doctor2: 14, Paciente: 8; Doctor1: 1, Doctor2: 14, Paciente: 71; Doctor1: 7, Doctor2: 1, Paciente: 24; Doctor1: 1, Doctor2: 14, Paciente: 14; Doctor1: 1, Doctor2: 14	270 Paciente: 3; Doctor1: 3, Doctor2: 10, Paciente: 9; Doctor1: 10, Doctor2: 3, Paciente: 10; Doctor1: 10, Doctor2: 3	320 Paciente: 1; Doctor1: 4, Doctor2: 8, Paciente: 20; Doctor1: 8, Doctor2: 4	310 Paciente: 15; Doctor1: 7, Doctor2: 2, Paciente: 18; Doctor1: 2, Doctor2: 4	285
Tarde	Tarde	Tarde	Tarde	Tarde
	Paciente: 19; Doctor1: 13, Doctor2: 10, Paciente: 30; Doctor1: 10, Doctor2: 13	205		
Pabellón 4				
Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Paciente: 4; Doctor1: 3, Doctor2: 5, Paciente: 7; Doctor1: 3, Doctor2: 5	285 Paciente: 62; Doctor1: 6, Doctor2: 13, Paciente: 26; Doctor1: 6, Doctor2: 13, Paciente: 11; Doctor1: 6, Doctor2: 13, Paciente: 13; Doctor1: 6, Doctor2: 13, Paciente: 12; Doctor1: 6, Doctor2: 13, Paciente: 16; Doctor1: 6, Doctor2: 13	295	Paciente: 21; Doctor1: 9, Doctor2: 10, Paciente: 23; Doctor1: 9, Doctor2: 10, Paciente: 17; Doctor1: 10, Doctor2: 9	280
Tarde	Tarde	Tarde	Tarde	Tarde
Paciente: 6; Doctor1: 3, Doctor2: 5, Paciente: 28; Doctor1: 3, Doctor2: 5, Paciente: 5; Doctor1: 3, Doctor2: 5	195		Paciente: 22; Doctor1: 9, Doctor2: 10	179

**Tabla 4-8: Programación de pabellones utilizando los modelos propuestos sin considerar los mismos médicos asignados y sin conservar el primer paciente**

Este escenario corresponde al de 100 pacientes, 10 jornadas disponibles, duraciones de intervenciones promedio del 37.5% de la duraciones de las jornadas y jornadas disponibles a priori de 4,5 promedio por paciente. Con esto se obtiene el siguiente resultado:

	Minutos Utilizados	Minutos Disponibles	Porcentaje de utilización	Mejora
<b>Caso Real</b>	2185	2820	77,5%	-
<b>Primer Caso Programado</b>	2455	2820	87,1%	<b>9,6%</b>
<b>Segundo Caso Programado</b>	2624	2820	93,0%	<b>15,6%</b>

**Tabla 4-9: Resultados Obtenidos en un caso real**

Esto permite mostrar que la elección de políticas menos restrictivas impacta positivamente en la utilización del pabellón y que la programación de pabellones, utilizando los métodos aquí descritos puede aumentar en un caso real la utilización del pabellón.

Es muy importante notar el potencial de las mejoras que presenta la utilización de modelos de optimización aplicados a problemas como el caso de la programación de pabellones. En este sentido, esta tesis muestra una ventaja en la utilización de analítica en un problema real y cuyo impacto es muy significativo, desde el punto de vista del hospital y de los pacientes.

La utilización de modelos de optimización puede, según lo mostrado, incrementar significativamente el número de intervenciones quirúrgicas, sin necesidad de incrementar los costos asociados a los recursos utilizados. Dado que el 40%, aproximadamente, de los costos del hospital se obtienen por las intervenciones quirúrgicas [23], las mejoras en esta área impactarían significativamente los resultados económicos del hospital.

Desde el punto de vista de los pacientes, el incremento en el número de intervenciones realizadas se manifiesta como una reducción en los tiempos de espera de todos los pacientes en lista de espera. Por otro lado, la utilización de políticas de priorización que consideran no solo la gravedad del diagnóstico, sino que el tiempo de espera del paciente, permiten incorporar criterios de equidad y oportunidad en el acceso a la salud.

## **Capítulo 5**

### **Conclusiones y Trabajo Futuro**

A partir de los resultados obtenidos y que se mostraron en el capítulo anterior se plantean las conclusiones sobre el trabajo realizado en esta tesis. En este capítulo, también se presentan los posibles trabajos futuros y complementos al modelo que se desprenden del desarrollo de esta tesis.

#### **5.1 Conclusiones**

Las conclusiones de esta tesis se pueden dividir principalmente en dos. La primera, es que los modelos permiten programar pabellones quirúrgicos en los hospitales estudiados de

manera eficiente y respetando consideraciones tanto administrativas como de carácter biomédico. La segunda, es que la elección de un modelo de programación de pabellones quirúrgicos en un hospital público no es única y depende de muchos factores. Estas conclusiones serán presentadas con mayor detalle a continuación.

### ***5.1.1 Conclusiones sobre los resultados del proyecto***

Los modelos desarrollados permiten entregar soluciones a la programación de pabellones quirúrgicos en hospitales públicos, aceptables por los médicos encargados. Estos modelos, también son capaces de evaluar desde el punto de vista de la utilización de pabellón, distintas políticas de liberación de restricciones, asociadas a las asignaciones de médicos a pacientes. Un ejemplo de esto es lo que se evaluó en distintos escenarios y donde la única variación entre éstos fue la asignación de médicos a pacientes específicos. Es posible observar que la utilización del pabellón aumenta mientras menos restricciones de este tipo se incorporen.

Dependiendo del modelo, ellos reflejan, en mayor o menor medida, los objetivos que se pretende desde el punto de vista del hospital. Los objetivos que son incorporados en este diseño se detallan en la sección 2.2 y fueron acordados con los médicos encargados de pabellón en los hospitales estudiados.

Las consideraciones particulares de este problema mencionadas en la sección 2.2 son factibles de ser incorporadas como restricciones en los modelos de programación entera y en los algoritmos computacionales como los descritos en esta tesis.

Un aporte importante de esta tesis es la incorporación de la prioridad relativa del paciente y cómo el manejo de ésta puede ser fundamental en el modelamiento del problema de programación de pabellones quirúrgicos. Como se vio en la literatura consultada, en muchos estudios la decisión de asignación se centra en intentar minimizar los costos de operación,

pero no incorporan criterios como el tiempo de espera del paciente y su condición biomédica. En este sentido, estos modelos se centran en presentar soluciones al problema que enfrentan en la actualidad los hospitales públicos de Chile, donde es posible encontrar listas de espera con pacientes que llevan esperando varios años por intervenciones quirúrgicas electivas. En muchos casos, estas listas de espera no están priorizadas o los métodos empleados para la priorización no consideran factores como el tiempo de espera, centrándose sólo en la prioridad biomédica asignada al diagnóstico. En esta tesis, se propone en conjunto con los métodos de programación de pabellones una metodología de priorización que se ajusta a los requerimientos de los hospitales públicos de Chile y a los datos de los pacientes que éstos manejan. Una propuesta interesante en esta tesis es unificar la problemática de la prioridad de los pacientes con la programación de los pabellones y no considerarlos problemas separados.

Una consideración muy importante de tener en cuenta si se pretende implementar una solución de este tipo, es la estimación de los tiempos quirúrgicos. Mientras más precisas sean estas estimaciones, mejores serán los resultados de los modelos. Si las estimaciones de tiempo quirúrgicos son más largas que los tiempos quirúrgicos reales, entonces esto dará origen a resultados menos eficientes desde el punto de vista de la utilización de pabellón. Por otro lado, si los tiempos quirúrgicos estimados son menores que los tiempos quirúrgicos reales, se programarán pacientes que no podrán ser atendidos, lo que generará cancelaciones de pacientes con el evidente daño que se causa tanto al paciente como a la mala utilización de recursos del hospital.

Los tiempos de ejecución de algunos modelos se ajustan a los requerimientos de diseño investigados en las especialidades de los hospitales estudiados. Esto se mostró en la sección 4.3.1 de manera particular para cada modelo.

Los modelos desarrollados permiten entregar utilidades de pabellón entre un 10% y un 15% sobre la situación actual. Este número depende de las restricciones que se consideren para la programación. Los modelos aquí desarrollados permitirían evaluar el impacto de

políticas de este estilo, si se incorporaran a los pacientes en lista de espera la predicción de pacientes.

El computador donde se evaluaron los modelos, es un computador personal de uso domiciliario, esto quiere decir que frente a una implementación real no se requiere de grandes inversiones en aparatos tecnológicos sofisticados, que sin duda, permitirían disminuir los tiempos de ejecución.

### **5.1.2 Conclusiones sobre la elección del modelo**

La elección del modelo que entrega mejores resultados, no es única. Antes de apresurarse con una conclusión, hay que tener muy clara algunas consideraciones particulares de funcionamiento, de las especialidades y los hospitales, así como de las características de los pacientes y sus intervenciones.

El modelo de programación entera con asignación independiente, entrega en todos los escenarios estudiados, la mejor solución desde el punto de vista del respeto de las prioridades relativas entre pacientes. Los tiempos de ejecución fueron, en este caso, muy superiores a los especificados en el diseño. Sin embargo, si la programación de pabellones se realiza una vez por semana y no se realizan modificaciones sobre los resultados obtenidos que requieran una nueva programación, entonces la elección segura es este modelo.

Si las características de los pacientes y del hospital hacen que las combinaciones factibles en la programación del pabellón sean limitadas y si se requiere de reprogramaciones, entonces se debería utilizar en primera instancia el algoritmo del tipo *Backtracking*, ya que éste es capaz bajo ciertas condiciones de entregar resultados en tiempos cercanos a 1[s] y respetando las prioridades relativas de los pacientes. La elección de este método debe estar acompañada de otro mecanismo de respaldo, ya que la capacidad del método de entregar resultados o no, dependerá de las condiciones de los pacientes, de las intervenciones, de las características del hardware utilizado para la ejecución y de las características del hospital.

Pese a que teóricamente la utilización del  $Pri_p$  en la función objetivo del modelo de programación entera supone un error, debido a las magnitudes de los números que se manejan. Los resultados en el 48,6% de los escenarios estudiados entregaron la misma solución que el modelo de programación entera con asignación independiente. Los casos donde el resultado se vio afectado corresponden, principalmente a los escenarios donde el número de pacientes fue 200, es decir:

$$\max(Pri_p) \approx 10^{60} \quad (5.1)$$

Este resultado era previsible, sin embargo, el paquete optimizador IBM ILOG CPLEX 12.2.0.0 no es capaz de manejar números de estas magnitudes. Específicamente, éste define la barrera de valor máximo de la función objetivo (CPX\_PARAM\_BAROBJRNG) en  $10^{20}$ . Cuando los pacientes son menos de 66 en el peor de los casos el valor de la función objetivo no excede este valor, por lo cual se obtiene buenos resultados. Para los escenarios de 100 o 200 pacientes, este número fue excedido, por lo cual la calidad de estos resultados es deficiente. Es decir, para escenarios de programación donde el número de pacientes sea superior a 67 este modelo no es recomendado.

Como se mostró en la sección 2.3, la prioridad de los pacientes está dada por el cálculo del NAWD, esto fue acordado en conjunto con los médicos y refleja la importancia de considerar factores biomédicos y de tiempos de espera, a la hora de entregar un número que permita priorizar a los pacientes que deben ser intervenidos quirúrgicamente.

La forma en la cual influye el NAWD en la decisión de asignación de pacientes cada semana, puede ser acordada con los encargados del hospital. En esta tesis se consideran dos tipos de decisión de asignación: la que se refleja en el modelo de programación entera y la que se refleja en los modelos de programación entera con prioridad modificada. En el modelo de programación entera y su variante, esta asignación respeta estrictamente el orden dado por los NAWD de los pacientes. En el caso de los modelos de programación entera con prioridad

modificada, lo que se hace es dividir la lista de pacientes según los valores de sus NAWD en 5 categorías y luego se calcula un ponderador que incorpora el tiempo quirúrgico como uno de factores. Esto se hace para reemplazar el  $Pri_p$  por un ponderador por paciente, que tiene magnitudes más manejables, pero que sigue reflejando la prioridad relativa de cada paciente.

Los modelos de programación entera con prioridad modificada desarrollados en esta tesis, presentan importantes mejoras en lo que respecta a los tiempos de ejecución y utilización de pabellón. Sin embargo, éstos no reflejan la prioridad estricta, determinada por el cálculo de los NAWD. En este sentido, la elección de los modelos de este tipo requiere de la aprobación de los encargados del hospital en este punto específico.

Otro punto importante de concluir sobre los modelos de programación entera con prioridad modificada, tiene que ver con la elección de  $\alpha$  y  $\beta$ . Como se observó en los resultados, la elección de estos valores no debe ser única ni fija, ya que para distintos escenarios, distinto fue el resultado de los modelos desde el punto de vista de la prioridad y la utilización. Si modelos de este tipo son elegidos, se requerirá que constantemente estos valores se estén calibrando para asegurar que los modelos entregarán buenas soluciones.

Los tiempos de ejecución del algoritmo del tipo *Backtracking* motivan que este sea parte de la solución final. Sin embargo, en algunos casos como se mostró, éste no termina su ejecución. Por su parte, el modelo de programación entera con prioridad modificada mostró tiempos de ejecución razonables para los requerimientos y resultados de calidad aceptable. Con respecto a la elección para una implementación robusta, la solución sería utilizar en primera instancia el algoritmo del tipo *Backtracking*, en caso que este sobrepase un determinado tiempo de ejecución, lo recomendable sería utilizar el modelo de programación entera con prioridad modificada, ya que independiente del número de pacientes de la lista de espera, este modelo tiene tiempos de ejecución que se ajustan a los requerimientos del diseño.

## 5.2 Directrices de Trabajos futuros

Los modelos y métodos desarrollados en esta tesis pueden ser mejorados. Como se vio en el capítulo de resultados, los modelos presentan algunos problemas en lo que refiere al uso de la memoria y el tiempo de ejecución. Con la adición de algunas modificaciones se puede mejorar el comportamiento. En esta sección se pretende mostrar directrices de trabajos futuros proponiendo algunas mejoras a los modelos propuestos.

### 5.2.1 Mejora del algoritmo del tipo *Backtracking*

Al método presentado en la sección 3.1.4 se le puede agregar otro algoritmo que permite reducir el número de combinaciones factibles o rutas, antes que la creación de éstas colapse el espacio disponible en memoria. Como se vio en el capítulo de los resultados, el algoritmo del tipo *Backtracking* presentaba problemas cuando el número de combinaciones factibles empezaba a ocupar la memoria disponible. La mejora presentada va en este sentido y consiste en agregar una función adicional que verifique constantemente la utilización de la memoria y en caso que ésta sobrepase un porcentaje determinado, se active un método que seleccione sólo las mejores soluciones, para continuar con la creación de rutas (ver Figura 5-1).

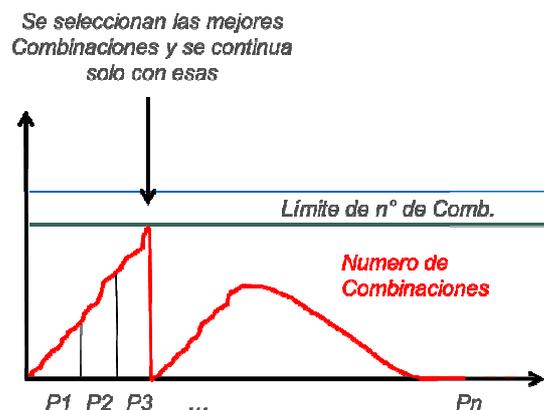


Figura 5-1: Mejora al algoritmo del tipo *Backtracking*

La selección de rutas se compone principalmente de 2 métodos: el primero, tiene que ver con agrupar la gran cantidad de soluciones en soluciones parecidas y el segundo, se encarga de seleccionar dentro de cada grupo, a priori la mejor.

#### **5.2.1.1 Método de Agrupación**

Este método inicia cuando el número de rutas creadas sobrepasa un número pre establecido como límite. En tal caso, se activa un método que parte con las rutas creadas hasta el paciente anterior.

Lo primero, es sacar la primera ruta de la pila, luego se saca la segunda y se resta término a término los números del arreglo. Luego, se cuenta la cantidad de ceros que quedaron (mismos pacientes asignados en las mismas jornadas). Con este dato se puede establecer el grado de semejanza entre una ruta y otra.

En un principio, puede ser suficiente un 50% de la cantidad de ceros por número de pacientes por ruta para considerar dos rutas semejantes, es decir:

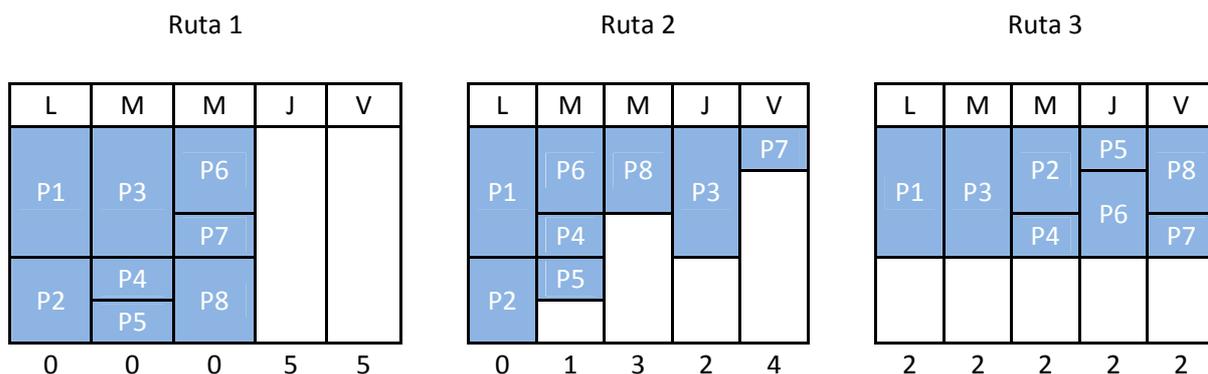
$$0,5 \leq \frac{\text{Cantidad de ceros}}{\text{Número de Pacientes por Ruta}}$$

Luego, se repite el procedimiento para lograr grupos de rutas semejantes.

#### **5.2.1.2 Método de Selección**

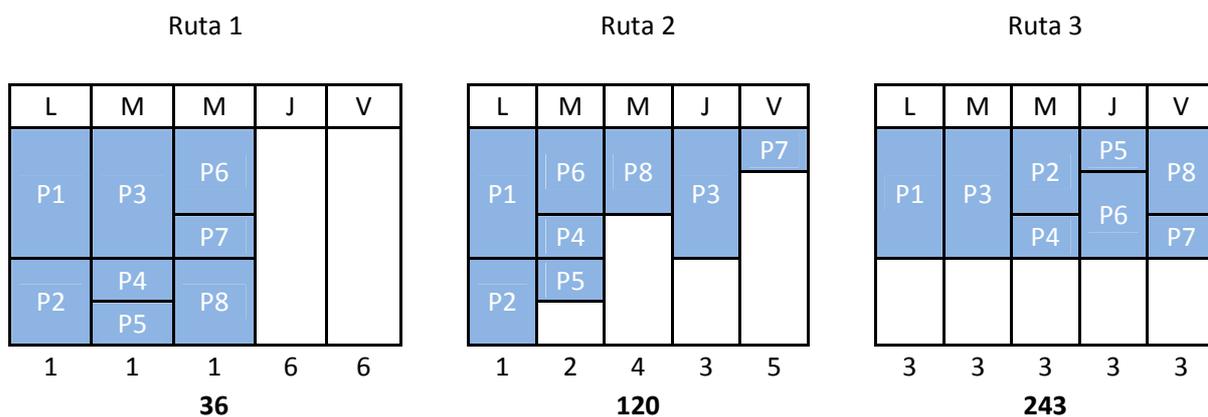
La mejor solución parcial en cada uno de los grupos definidos anteriormente se puede definir como la solución que deja espacios de tamaños más grandes.

Una forma que se propone para evaluar las rutas generadas es multiplicar los tamaños de los espacios vacíos dentro de cada ruta. Como se muestra en el siguiente ejemplo donde se suponen 3 rutas diferentes. Para esto, se consideran los espacios disponibles en cada jornada (de las 5), como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 5-2: Método de Selección 1**

Si se observa, en las 3 rutas son los mismos pacientes asignados, pero repartidos de diferente forma. El número que aparece bajo cada jornada representa la cantidad de bloque horarios no cargados. A este valor, a cada jornada se suma 1 y se multiplican para obtener un valor que representa cada jornada. Como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 5-3: Método de Selección 2**

En este caso la ruta con el resultado menor es la que posee el menor valor calculado. Ésta puede ser considerada, a priori, como la mejor solución.

Sin duda, la adición de este método podría perjudicar la calidad de las soluciones obtenidas finalmente, ya que con la aplicación podría eliminar soluciones que en un principio parecían muy malas, pero que finalmente podrían ser muy buenas.

Una forma de controlar el deterioro de la calidad de las soluciones es manejar parámetros como:

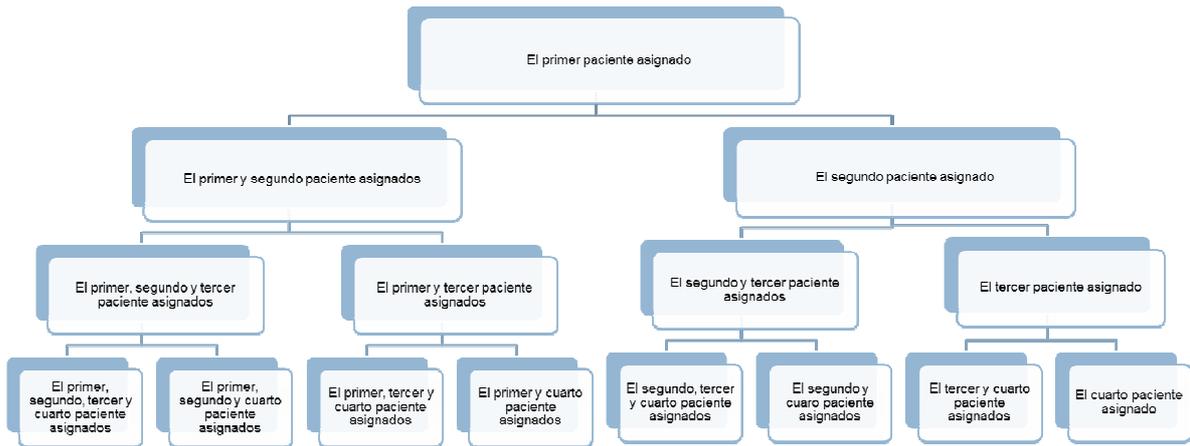
1. La cantidad de ceros por número de pacientes por ruta, en el método de agrupación. Esto permitirá tener más grupos y por lo tanto menos soluciones eliminadas.
2. La cantidad de rutas seleccionadas en método de selección. (ej.: elegir las 2 mejores)
3. La diversidad de las rutas seleccionadas en método de selección. (ej.: elegir las 2 mejores y las 2 peores)

### ***5.2.2 Mejora al modelo de programación entera con asignación independiente***

La mejora en este modelo se enfoca principalmente en disminuir sus tiempos de ejecución. En este caso existen dos alternativas: la primera, es disminuir los tiempos de ejecución de los modelos de factibilidad. Para esto es posible investigar otros paquetes optimizadores más rápidos que el utilizado o simplemente modificar el método de búsqueda de soluciones factible. La segunda alternativa, es la que se detalla a continuación.

La mejora presentada en esta sección está enfocada en mejorar el tiempo de ejecución del modelo de programación entera con asignación independiente presentado en la sección 3.1.3. Específicamente, en modificar la forma de recorrer el árbol binario del problema de asignación.

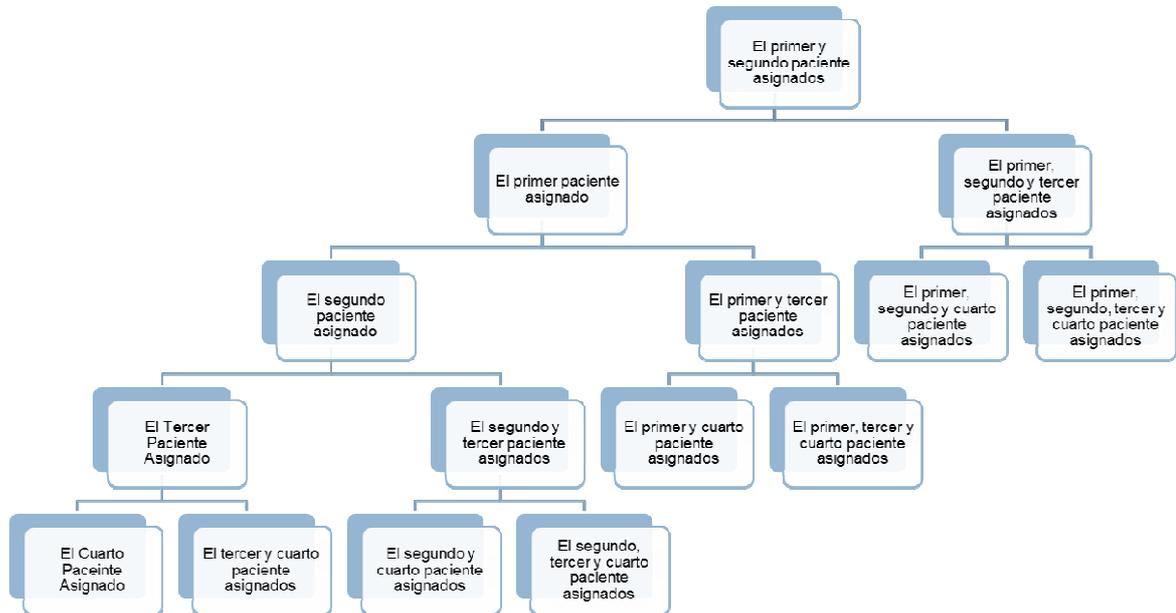
Para explicar el método se presenta un ejemplo con 4 pacientes. Aquí, las combinaciones de asignaciones pueden ser 16, pero si se considera que el primer paciente sí es asignado, entonces el número de combinaciones posibles es 8. En el caso anterior se tenía un árbol de la siguiente forma:



**Figura 5-4: Mejora al modelo de programación entera con asignación independiente 1**

donde cada nodo representa una solución intermedia. En cada nodo intermedio es posible evaluar la factibilidad de dicha solución. Existen para cada solución intermedia dos posibilidades que definen a los nodos adyacentes a estos: es factible o no es factible. A los nodos adyacentes se les agrega a la solución del nodo padre un nuevo paciente para construir una nueva solución intermedia. El árbol finaliza cuando se han agregado todos los pacientes en orden prioritario.

La idea de modificar la forma en la que se prueban soluciones factibles es disminuir la cantidad de veces que se ejecuta el modelo de factibilidad. Una estrategia puede ser partir desde otra solución, por ejemplo, asignar la primera mitad de los pacientes y no asignar la segunda mitad. Es decir, empezar asumiendo que la mitad de los pacientes si puede ser asignado y verificar la factibilidad.



**Figura 5-5: Mejora al modelo de programación entera con asignación independiente 2**

Con esta forma de recorrer los nodos se podría reducir la cantidad de veces que se ejecuta el modelo de factibilidad, en la medida en que el primer nodo elegido sea más cercano a la solución óptima. La disminución en la cantidad de veces que se ejecuta el modelo de factibilidad, sin duda disminuirá el tiempo de ejecución total del modelo.

### 5.3 Complementos al Modelo

El cálculo de la tabla quirúrgica, que es apoyado por los modelos de programación de pabellones, es sólo una parte del complejo proceso de programar los pabellones en un hospital público. Otros procesos influyen sobre estos y muchos otros se llevan a cabo en función de la planificación que estos contienen. En este sentido, los modelos por si solos difícilmente pueden ser utilizados sin una plataforma computacional que haga más fácil la ejecución de estos. Los modelos aquí presentados contienen varios parámetros de los cuales depende la calidad del resultado. Estos parámetros, en su mayoría, requieren ser calibrados dependiendo de los escenarios en los que se trabaje.

Para ser implementable en un hospital público de Chile, los modelos presentados como solución deben incorporar una serie de consideraciones que apuntan en la dirección de los requerimientos del usuario. Estos están relacionados con el manejo de la información que ésta necesita. La programación de pabellones requiere de una gran cantidad de información de los pacientes y de los recursos del hospital. Esta información debe poder ser capturada y debe existir la capacidad de ser modificada por el personal calificado.

Sin duda, la programación de los pabellones, así como cualquier otra técnica de optimización, pueden tener un impacto significativo en el hospital, pero requiere de un compromiso de toda la organización, en especial de los médicos, los cuales actualmente son los encargados de la programación de los pabellones y de la dirección del hospital.

## Capítulo 6

### Referencias bibliográficas

- [1] Ashton T., Cumming J. y Devlin N. 1999. *Prioritizing health and disability support services: principles, processes and problems*, A report to the National Health Committee on the HFA's proposed prioritization process.
- [2] Barros O. 2007. *Proyecto de Patrones de Procesos de Negocios*. (On line)  
[http://obarros.cl/proyecto\\_patrones\\_de\\_negocios.html](http://obarros.cl/proyecto_patrones_de_negocios.html).

- [3] **Beliën J. y Demeulemeester E.** 2007. *Building cyclic master surgery schedules with leveled resulting bed occupancy*, European Journal of Operational Research, 176(2):1185-1204.
- [4] **Beliën J. y Demeulemeester E.** 2004. *Integer programming for building robust surgery schedules*, Research Report, OR 0446.
- [5] **Beliën J., Demeulemeester E. y Cardoen B.** 2006. *Visualizing the demand for various resources as a function of the master surgery schedule: A case study*, Journal of Medical Systems, 30(5):343-350.
- [6] **Blake J. y Donald J.** 2002. *Mount Sinai Hospital uses integer programming to allocate operating room time*, Interfaces, 32:63-73.
- [7] **Blake J., Dexter F. y Donald J.** 2001. *Operating Room Managers' Use of Integer Programming for Assigning Block Time to Surgical Groups: A Case Study*. International Anesthesia Research Society, 94:143-148.
- [8] **Cardoen B., Demeulemeester E. y Beliën J.** 2009. *Optimizing a multiple objective surgical case scheduling problem*, International Journal of Production Economics, (Online) [https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/120976/1/KBI\\_0625.pdf](https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/120976/1/KBI_0625.pdf).
- [9] **Cardoen B., Demeulemeester E. y Beliën J.** 2009. *Scheduling surgical cases in a day-care environment: An exact branch-and-price approach*, Computers and Operations Research, 36(9):2660-2669.
- [10] **Cardoen B., Demeulemeester E. y Beliën J.** 2010. *Operating room planning and scheduling: A literature review* European Journal of Operational Research, 201: 921-932.

- [11] **Cormen T., Leiserson C., Rivest R. y Stein C.** 2001. *Introduction to Algorithms*. McGraw-Hill. 2nd ed.
- [12] **Dexter F. y Macario A.** 2002. *Changing allocations of operating room time from a system based on historical utilization to one where the aim is to schedule as many surgical cases as possible*. *Anesthesia and Analgesia*, 94:1272-1279.
- [13] **Hadorn D. y The Steering Committee of the Western Canada,** 2003. *Waiting List Project Setting priorities on waiting lists: point-count systems as linear models*, *Journal of Health Services Research & Policy*, 8(1): 48–54.
- [14] **Hans E., Nieberg T. y Van Oostrum J.M.** 2007. *Optimization in surgery planning*, *Medium Econometrische Toepassingen*, 15:20-28.
- [15] **Hughes W.L. y Soliman, S.Y.** 1985. *Short-term case mix management with linear programming*, *Hospital and Health Service Administration*, 30(1):52-60.
- [16] **Jansson A. y Delgado C.** 2000. *Optimización del proceso de cirugía en hospitales públicos. Una aplicación de la modelación matemática entera a la prestación de atención quirúrgica en el hospital del Salvador, Santiago de Chile*. *Pharos*. 7(1):31-62.
- [17] **Jebali A., Alouane A.B.H. y Ladet P.** 2006. *Operating rooms scheduling*, *International Journal of Production Economics*, 99:52-62.
- [18] **Lamiri M., Xie X., Dolgui A. y Grimaud F.** 2008. *A stochastic model for operating room planning with elective and emergency demand for surgery*. *European Journal of Operational Research* 185:1026–1037.

- [19] **Lofvendahl S., Eckerlund I., Hansagi H. Malmqvist B., Resch S. y Hanning M.** 2005. *Waiting for orthopedic surgery: factors associated with waiting times and patients' opinion*, International Journal for Quality in Health Care, 17(2):133-140.
- [20] **Manual de Instrucciones REM - 2010 - Serie B**, Ministerio de Salud de Chile, 2010
- [21] **Pérez B., Arenas M., Bilbao A. y Rodríguez M.V.** 2005. *Management of surgical waiting lists through a possibilistic linear multiobjective programming problem*. Applied Mathematics and Computation 167:477–495.
- [22] **Persson M. y Persson J.A.** 2009. *Health economic modeling to support surgery management at a Swedish hospital*. Omega 37:853–863.
- [23] **Pham D. N. y Klinkert. A.** 2008. *Surgical case scheduling as a generalized job shop scheduling problem*, European Journal of Operational Research, 185:1011-1025.
- [24] **Roland B., Di Martinelly C. y Riane F.** 2006. *Operating theatre optimization: A resource constrained based solving approach*, Service Systems and Service Management, 2:443-448.
- [25] **Santibáñez P., Begen M. y 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 Manage Sci 10:269-282.
- [26] **Testi A., Tanfani E. y Torre G.** 2007. *A three-phase approach for operating theatre schedules*, Health Care Manage Sci, 10:163–172.
- [27] **Testi A., Tanfani E., Valente R., Ansaldo L. y Torre C.** 2006. *Prioritizing surgical waiting lists. University of Genova, Villa Scassi Hospital, Génova, Italy*. Journal of Evaluation in Clinical Practice 14:59-64.

- [28] **Zhang B., Murali P., Dessouky M. y Belson D.** 2009. *A mixed integer programming approach for allocating operating room capacity*. Journal of the Operational Research Society 60: 663-673.

# Capítulo 7

## Anexos

### 7.1 Determinación del valor de $PRI_p$

La regla lexicográfica: “Es mejor operar a un paciente urgente, que todo el resto de pacientes menos prioritarios que éste” representa una complicación en el modelamiento matemático. Esta complicación deriva de los valores que toman  $PRI_p$  para los pacientes más prioritarios.

Para determinar el valor de  $PRI_p$ , se considera  $\varepsilon$  como el valor del paciente menos prioritario y  $\delta_i$  como el incremento del  $i$ -ésimo paciente. Se considera, también que el número de pacientes es mayor que 4. Para cumplir con la regla lexicográfica definida anteriormente se debe cumplir que  $\delta_i > 0, \forall i$ , entonces se tiene:

$$Pri_N = \varepsilon \quad (7.1)$$

$$Pri_{N-1} = \varepsilon + \delta_1 \quad (7.2)$$

$$Pri_{N-2} = 2\varepsilon + \delta_1 + \delta_2 \quad (7.3)$$

⋮

$$Pri_{N-j} = 2^{j-1} \cdot \varepsilon + \sum_{k=1}^{j-1} 2^{j-(k+1)} \cdot \delta_k + \delta_j, \forall j \in \{2, \dots, N-1\} \quad (7.4)$$

Como se sabe que la prioridad debe ser mayor que 0 (debido a que se encuentra en la función objetivo y siempre será mejor agregar a un paciente, aunque sea menos prioritario) entonces se tiene que  $\varepsilon > 0$ .

Con un cambio de variables se tiene:

$$Pri_{N-j} = 2^{j-1} \cdot \varepsilon + \sum_{m=0}^{j-2} 2^m \cdot \delta_{m+1} + \delta_j, \forall j \in \{2, \dots, N-1\} \quad (7.5)$$

como  $\delta_i > 0, \forall i$

$$\sum_{m=0}^{j-2} 2^m \cdot \delta_{m+1} + \delta_j > 0 \quad (7.6)$$

es decir que,

$$Pri_{N-j} > 2^{j-1} \cdot \varepsilon \quad (7.7)$$

Es decir, aparece un término exponencial en la función objetivo que depende del número de pacientes que se intente programar.

### 7.1.1 Valores enteros de $Pri_P$

Si se utilizan valores enteros, no es difícil notar que también aparecerán términos exponenciales. Para el caso entero se tiene  $\varepsilon = 1$  y para  $\delta_i = 1, \forall i$  se tiene:

$$Pri_{N-j} = 2^{j-1} + \sum_{m=0}^{j-2} 2^m + 1, \forall j \in \{2, \dots, N-1\} \quad (7.8)$$

por la fórmula de progresión geométrica,

$$Pri_{N-j} = 2^{j-1} + \left( \frac{1-2^{j-1}}{1-2} \right) + 1, \forall j \in \{2, \dots, N-1\} \quad (7.9)$$

luego

$$Pri_{N-j} = 2^{j-1} + 2^{j-1} \quad (7.10)$$

$$Pri_{N-j} = 2^j \quad (7.11)$$

Para el caso del paciente P se tiene:

$$Pri_P = 2^{N-P} \quad (7.12)$$

Para el caso del paciente más prioritario se tiene  $P=1$ , con esto

$$Pri_1 = 2^{N-1} \quad (7.13)$$

## 7.2 Algoritmo de Backtracking

*Backtracking* [11] es una estrategia para encontrar soluciones a problemas que consideran una serie de restricciones. La idea de *Backtracking* es recorrer un grafo dirigido con el objetivo de encontrar soluciones para algún problema. Los vértices del grafo representan posibles estados de la solución del problema y cada arco del grafo representa la transición entre dos estados.

Para encontrar la solución del problema completo, se construyen soluciones parciales a medida que progresa el recorrido. Estas soluciones parciales limitan las regiones en las cuales se encuentra la solución final. Una ventaja de esto es resolver varios problemas más simples que el problema completo. La principal virtud del *Backtracking* es que en la mayoría de las implementaciones se puede evitar, a priori, combinaciones no factibles o difícilmente óptimas. Si se establecen funciones de acotación se puede llegar a reducciones significativas en el tiempo de ejecución.

En su versión más simple, el algoritmo recorre el grafo en una dirección y si encuentra una solución factible continúa con las soluciones parciales asociadas a ese nodo, en caso contrario, puede detenerse o seguir buscando soluciones parciales alternativas. Durante la búsqueda, si se encuentra una alternativa no factible o no óptima, la búsqueda retrocede hasta el nodo anterior y toma la alternativa no recorrida. Cuando se han terminado los nodos, se vuelve al nodo anterior y se toma la siguiente opción. Si no hay más alternativas la búsqueda finaliza.

Existen variantes en distintas implementaciones de *Backtracking*, algunas muy complejas y apuntan a acelerar el proceso de búsqueda y/o acotamiento.

## 7.3 Datos utilizados en las pruebas de los modelos

En esta sección se muestran los datos requeridos para resolver el problema. En la primera parte se muestran los datos que se requieren de los pacientes y a continuación los datos que se requieren del hospital.

### 7.3.1 Datos de los pacientes

Por razones de confidencialidad de la información del hospital, la información aquí mostrada no contiene datos que permitan identificar a los pacientes. En este caso se utilizó información real, de lo ocurrido la segunda semana de Agosto del 2009 en el Hospital Luis Calvo Mackenna. Este ejemplo corresponde a 100 pacientes, 10 jornadas, 90 minutos de promedio de duraciones de las intervenciones y con un promedio de pre factibilidad de jornadas por pacientes de 2,5.

#### 7.3.1.1 Lista de pacientes priorizada

En la tabla siguiente, para cada paciente la lista contiene los siguientes ítems:

1. Id: Número que permita su identificación. Este número indica también la prioridad asignada en el proceso anterior de priorización de pacientes.
2. Tiempo: Tiempo estimado de duración de la intervención medido en minutos.
3. Especial: Si el paciente tiene alguna complicación que obligue a realizar la intervención sólo a primera hora de la mañana.
4. Id de intervención: Intervención quirúrgica que se debe realizar al paciente.
5. Medico: En caso que la intervención no pueda ser realizada por cualquier médico, este número indica qué médico debe realizarla. Si es cero indica que cualquier médico (que sabe realizar esa intervención) puede ser asignado.

ID	Tiempo	Especial	Intervención	Médico
1	180	1	39	0
2	90	0	36	1
3	180	1	15	3
4	20	0	3	3
5	50	0	5	3
6	80	0	19	3
7	220	1	4	3
8	60	0	40	5
9	60	0	13	5
10	60	0	13	5
11	50	0	2	6
12	45	0	8	6
13	60	0	40	6
14	60	0	40	6
15	170	1	28	7
16	50	0	34	7
17	80	0	41	8
18	120	1	31	2
19	70	0	35	0
20	90	0	38	2
21	150	1	23	9
22	150	0	20	9
23	60	0	21	9
24	50	1	34	1
25	180	0	32	1
26	60	0	40	5
27	180	0	15	3
28	50	0	18	3
29	120	1	14	10
30	90	0	19	10
31	70	0	35	10
32	80	0	19	5
33	60	0	40	5
34	45	0	8	10

ID	Tiempo	Especial	Intervención	Médico
35	180	1	17	11
36	160	0	24	11
37	220	1	26	8
38	55	0	40	8
39	60	0	13	10
40	140	0	14	10
41	140	0	14	10
42	150	1	31	8
43	70	0	35	7
44	90	0	38	7
45	60	0	40	9
46	60	0	13	5
47	60	0	40	7
48	220	1	25	12
49	180	1	29	1
50	70	0	35	7
51	180	1	15	5
52	80	0	19	5
53	20	0	12	5
54	20	0	12	5
55	120	0	41	5
56	60	1	9	10
57	180	0	16	10
58	60	0	40	10
59	60	0	40	10
60	55	1	7	6
61	60	0	40	6
62	35	0	10	6
63	35	0	10	6
64	150	1	31	8
65	55	0	11	8
66	60	0	13	10
67	70	0	35	10
68	60	0	40	10

ID	Tiempo	Especial	Intervención	Médico
69	120	1	41	5
70	60	0	40	5
71	25	0	6	7
72	80	1	19	9
73	160	0	24	9
74	120	1	33	1
75	70	0	35	5
76	60	0	37	1
77	80	1	19	3
78	80	0	19	3
79	60	0	40	3
80	60	0	37	3
81	60	0	37	3
82	80	0	19	3
83	60	0	40	3
84	60	0	40	3
85	210	1	1	10
86	120	0	41	10
87	60	0	40	10
88	60	0	40	10
89	60	0	40	10
90	80	1	19	11
91	80	0	19	11
92	60	0	40	11
93	50	0	2	11
94	120	1	14	10
95	70	0	35	10
96	60	0	40	10
97	80	0	19	10
98	60	0	40	10
99	60	0	40	10
100	120	1	27	5

**Tabla 7-1: Ejemplo de datos de pacientes**

### 7.3.1.2 Duraciones reales de las intervenciones

Para los efectos de la programación sólo se requiere el valor estimado de las duraciones de las intervenciones, en este caso los valores se calcularon usando el promedio de las duraciones reales. Sin embargo, para la evaluación se utilizaron los valores reales de cada una de las intervenciones. En este caso, los valores reales de las duraciones de las intervenciones son los que se muestran en la siguiente tabla.

Paciente	Duración Real						
1	220	26	60	51	180	76	60
2	90	27	180	52	80	77	80
3	180	28	50	53	60	78	80
4	20	29	140	54	60	79	60
5	50	30	110	55	140	80	60
6	80	31	70	56	60	81	60
7	270	32	80	57	180	82	80
8	60	33	60	58	60	83	60
9	60	34	45	59	60	84	60
10	60	35	180	60	55	85	210
11	50	36	160	61	60	86	140
12	45	37	270	62	35	87	60
13	60	38	60	63	35	88	60
14	60	39	60	64	150	89	60
15	170	40	140	65	55	90	80
16	50	41	140	66	60	91	80
17	140	42	150	67	70	92	60
18	150	43	70	68	60	93	50
19	70	44	90	69	140	94	140
20	90	45	60	70	60	95	70
21	160	46	60	71	25	96	60
22	170	47	60	72	80	97	80
23	60	48	280	73	160	98	60
24	50	49	200	74	120	99	60
25	200	50	70	75	70	100	120

**Tabla 7-2: Ejemplo duraciones reales de las intervenciones de los pacientes**

### 7.3.1.3 Disponibilidad de pacientes en las jornadas

En esta tabla se indica si los pacientes están disponibles en las jornadas de atención. En caso de haber un problema, por ejemplo, el paciente 1 no está disponible en determinados horarios, esto es ingresado al modelo mediante la siguiente tabla.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	...	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
19	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...

**Tabla 7-3: Ejemplo disponibilidad de pacientes**

En este caso se consideró que todos los pacientes podrían ser operados en todas las jornadas.

### 7.3.1.4 Prioridad de pacientes

Como se muestra en la sección 7.1 el valor de  $PRI_p$ , es decir la prioridad asociada a cada paciente, aumenta de manera exponencial con respecto al número de pacientes. A continuación se muestran los valores que fueron utilizados en los ejemplos de 100 pacientes.

ID	Prioridad	ID	Prioridad	ID	Prioridad
1	633825300114115000000000000000	35	36893488147419100000	69	2147483648
2	316912650057057000000000000000	36	18446744073709600000	70	1073741824
3	158456325028529000000000000000	37	9223372036854780000	71	536870912
4	792281625142643000000000000000	38	4611686018427390000	72	268435456
5	396140812571322000000000000000	39	2305843009213690000	73	134217728
6	198070406285661000000000000000	40	1152921504606850000	74	67108864
7	990352031428304000000000000000	41	576460752303423000	75	33554432
8	495176015714152000000000000000	42	288230376151712000	76	16777216
9	247588007857076000000000000000	43	144115188075856000	77	8388608
10	123794003928538000000000000000	44	72057594037927900	78	4194304
11	618970019642690000000000000000	45	36028797018964000	79	2097152
12	309485009821345000000000000000	46	18014398509482000	80	1048576
13	154742504910673000000000000000	47	9007199254740990	81	524288
14	773712524553363000000000000000	48	4503599627370500	82	262144
15	386856262276681000000000000000	49	2251799813685250	83	131072
16	193428131138341000000000000000	50	1125899906842620	84	65536
17	967140655691703000000000000000	51	562949953421312	85	32768
18	483570327845852000000000000000	52	281474976710656	86	16384
19	241785163922926000000000000000	53	140737488355328	87	8192
20	120892581961463000000000000000	54	70368744177664	88	4096
21	604462909807315000000000000000	55	35184372088832	89	2048
22	302231454903657000000000000000	56	17592186044416	90	1024
23	151115727451829000000000000000	57	8796093022208	91	512
24	755578637259143000000000000000	58	4398046511104	92	256
25	377789318629572000000000000000	59	2199023255552	93	128
26	188894659314786000000000000000	60	1099511627776	94	64
27	944473296573929000000000000000	61	549755813888	95	32
28	472236648286965000000000000000	62	274877906944	96	16
29	236118324143482000000000000000	63	137438953472	97	8
30	118059162071741000000000000000	64	68719476736	98	4
31	590295810358706000000000000000	65	34359738368	99	2
32	295147905179353000000000000000	66	17179869184	100	1
33	147573952589676000000000000000	67	8589934592		
34	737869762948382000000000000000	68	4294967296		

Tabla 7-4: Ejemplo prioridad de pacientes

### 7.3.1.5 Prioridad modificada de pacientes

La prioridad de los pacientes es modificada en el modelo de programación entera con prioridad modificada. Los valores utilizados se muestran en la siguiente tabla:

ID	Prioridad	ID	Prioridad	ID	Prioridad
1	22088	35	176	69	25
2	12586	36	151	70	15
3	22088	37	202	71	5
4	3125	38	50	72	15
5	6271	39	75	73	30
6	1885	40	126	74	25
7	5052	41	126	75	15
8	377	42	151	76	15
9	377	43	75	77	15
10	377	44	100	78	15
11	250	45	75	79	15
12	250	46	75	80	15
13	377	47	75	81	15
14	377	48	202	82	15
15	756	49	176	83	15
16	250	50	75	84	15
17	377	51	176	85	40
18	630	52	75	86	25
19	377	53	25	87	15
20	503	54	25	88	15
21	756	55	126	89	15
22	756	56	75	90	15
23	377	57	176	91	15
24	250	58	75	92	15
25	883	59	75	93	10
26	75	60	50	94	25
27	176	61	75	95	15
28	50	62	50	96	15
29	126	63	50	97	15
30	100	64	151	98	15
31	75	65	50	99	15
32	75	66	75	100	25
33	75	67	75		
34	50	68	15		

**Tabla 7-5: Ejemplo prioridad modificada de pacientes**

### 7.3.2 Datos del hospital

Las siguientes secciones contienen las tablas con los datos del hospital que permiten ejecutar las pruebas que se realizaron a los modelos.

#### 7.3.2.1 Duraciones de las Jornadas

En esta sección se encuentra la duración de cada jornada en minutos. En este caso se muestran 20 jornadas con duraciones diferentes.

		ID	Minutos
<b>Pabellón 1</b>	Lunes Mañana	1	300
	Lunes Tarde	2	180
	Martes Mañana	3	300
	Martes Tarde	4	180
	Miércoles Mañana	5	300
	Miércoles Tarde	6	180
	Jueves Mañana	7	300
	Jueves Tarde	8	180
	Viernes Mañana	9	300
	Viernes Tarde	10	180
<b>Pabellón 2</b>	Lunes Mañana	11	300
	Lunes Tarde	12	180
	Martes Mañana	13	300
	Martes Tarde	14	180
	Miércoles Mañana	15	300
	Miércoles Tarde	16	180
	Jueves Mañana	17	300
	Jueves Tarde	18	180
	Viernes Mañana	19	300
	Viernes Tarde	20	180

**Tabla 7-6: Ejemplo duraciones de Jornadas**

### 7.3.2.2 Jornadas en las que trabajan los médicos

En este archivo se almacena la información detallada de la disponibilidad horaria del personal. El archivo corresponde a una tabla que contiene médicos y jornadas (la misma cantidad de las especificadas en el archivo de duración de jornadas).

		ID	Médico 1	Médico 2	Médico 3	Médico 4	Médico 5	Médico 6	Médico 7	Médico 8	Médico 9	Médico 10	Médico 11	Médico 12	Médico 13	Médico 14
Pabellón 1	Lunes Mañana	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
	Lunes Tarde	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Martes Mañana	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	Martes Tarde	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
	Miércoles Mañana	5	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
	Miércoles Tarde	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Jueves Mañana	7	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	Jueves Tarde	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Viernes Mañana	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Viernes Tarde	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pabellón 2	Lunes Mañana	11	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Lunes Tarde	12	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Martes Mañana	13	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
	Martes Tarde	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Miércoles Mañana	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	Miércoles Tarde	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	Jueves Mañana	17	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	Jueves Tarde	18	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	Viernes Mañana	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Viernes Tarde	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Tabla 7-7: Jornadas en las que trabajan los médicos**

### 7.3.2.3 Intervenciones que pueden realizar los médicos

Esta es una tabla que contiene “1” cuando el médico puede realizar esa intervención y “0” en el resto.

ID	Intervención 1	Intervención 2	Intervención 3	Intervención 4	Intervención 5	Intervención 6	Intervención 7	Intervención 8	Intervención 9	Intervención 10	Intervención 11	Intervención 12	Intervención 13	Intervención 14	Intervención 15	Intervención 16	Intervención 17	Intervención 18	Intervención 19	Intervención 20	Intervención 21	Intervención 22	Intervención 23	Intervención 24	Intervención 25	Intervención 26	Intervención 27	Intervención 28	Intervención 29	Intervención 30	Intervención 31	Intervención 32	Intervención 33	Intervención 34	Intervención 35	Intervención 36	Intervención 37	Intervención 38	Intervención 39	Intervención 40	Intervención 41	Intervención 42	Intervención 43				
Médico 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0		
Médico 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Médico 3	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0		
Médico 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	
Médico 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	
Médico 6	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0		
Médico 7	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0		
Médico 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	
Médico 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0		
Médico 10	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0		
Médico 11	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0		
Médico 12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0		
Médico 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0		
Médico 14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	

**Tabla 7-8: Intervenciones que pueden ser asignadas a los médicos**

### 7.3.2.4 Porcentaje de Ocupación esperado

En la siguiente tabla se muestra un ejemplo de los porcentajes de ocupación esperados para los médicos. Este dato es utilizado para repartir la carga de trabajo asignado a los médicos, suponiendo que no sólo existe una clase de médicos.

	ID	Porcentaje de Ocupación esperado
Médico 1	1	100
Médico 2	2	100
Médico 3	3	100
Médico 4	4	100
Médico 5	5	30
Médico 6	6	100
Médico 7	7	30
Médico 8	8	100
Médico 9	9	100
Médico 10	10	100
Médico 11	11	100
Médico 12	12	100
Médico 13	13	100
Médico 14	14	100

**Tabla 7-9: Ejemplo de porcentaje de ocupación esperado de los médicos**

## 7.4 Indicadores de calidad de la asignación

En las siguientes tablas se muestran los indicadores de la calidad de la asignación desde el punto de vista de la prioridad de los modelos desarrollados para los escenarios estudiados.

Número de Pacientes	Duraciones Promedio	Jornadas utilizadas	Número de Jornadas	AB	MPE	MPE2	MPE PM1	MPE PM2	MPE AI
50	12,5	5	2,5		15,051281	15,051281	15,051281	15,051281	15,051281
50	12,5	5	3,5		15,051500	15,051500	15,051500	15,051500	15,051500
50	12,5	5	4,5		15,051500	15,051500	15,051500	15,051500	15,051500
50	25	5	2,5		15,051281	15,051281	15,051281	15,051281	15,051281
50	25	5	3,5		15,051500	15,051500	15,051500	15,051481	15,051500
50	25	5	4,5		15,051500	15,051500	15,051496	15,051496	15,051500
50	37,5	5	2,5	15,051281	15,051281	15,051281	15,049976	15,051276	15,051281
50	37,5	5	3,5	15,051499	15,051499	15,051499	15,050190	15,051491	15,051499
50	37,5	5	4,5		15,051500	15,051499	15,050214	15,051475	15,051500
50	50	5	2,5	15,051236	15,051236	15,051236	15,048162	15,050413	15,051236
50	50	5	3,5	15,051447	15,051447	14,750470	15,048098	15,050624	15,051447
50	50	5	4,5	15,051487	15,051487	15,051487	15,048188	15,051473	15,051487
100	12,5	5	2,5		30,102781	30,102781	30,102781	30,102781	30,102781
100	12,5	5	3,5		30,103000	30,103000	30,103000	30,103000	30,103000
100	12,5	5	4,5		30,103000	30,103000	30,103000	30,103000	30,103000
100	25	5	2,5	30,102754	30,102754	30,102754	30,102754	30,102754	30,102754
100	25	5	3,5	30,102999	30,102999	30,102999	30,102986	30,101285	30,102999
100	25	5	4,5		30,102999	30,102999	30,102986	30,101285	30,102999
100	37,5	5	2,5	30,099370	30,099370	30,099370	30,099356	30,099356	30,099370
100	37,5	5	3,5	30,099592	30,099592	30,099592	30,099578	30,099578	30,099592
100	37,5	5	4,5	30,102983	30,102983	30,102983	30,102762	30,102762	30,102983
100	50	5	2,5		30,099353	29,801970	30,096296	30,096188	30,099353
100	50	5	3,5		30,099567	29,801970	30,097136	30,096163	30,099567
100	50	5	4,5		30,102575	30,102469	30,099700	30,099595	30,102575
200	12,5	5	2,5		60,205780	60,205780	60,205780	60,205780	60,205780
200	12,5	5	3,5		60,205999	60,205999	60,205999	60,205999	60,205999
200	12,5	5	4,5		60,205999	60,205999	60,205999	60,205999	60,205999
200	25	5	2,5	60,205754	60,205754	60,202372	60,205754	60,205754	60,205754
200	25	5	3,5	60,205999	60,202593	60,202593	60,205991	60,205991	60,205999
200	25	5	4,5		60,205999	60,205999	60,205999	60,205994	60,205999
200	37,5	5	2,5	60,202372	60,202342	60,202342	60,202369	60,202369	60,202372
200	37,5	5	3,5	60,202590	60,202543	60,202543	60,202580	60,202580	60,202590
200	37,5	5	4,5	60,205986	60,205973	60,205976	60,205986	60,205986	60,205986
200	50	5	2,5	60,202367	60,202328	60,202301	60,202366	60,202366	60,202367
200	50	5	3,5	60,202539	60,202356	60,202356	60,159472	59,985258	60,202539
200	50	5	4,5	60,205761	60,205761	60,205761	59,942309	59,898103	60,205761

**Tabla 7-10: Indicadores de la calidad de la asignación desde el punto de vista de la prioridad para los escenarios con 5 jornadas utilizadas**

Número de Pacientes	Duraciones Promedio	Jornadas utilizadas	Número de Jornadas	AB	MPE	MPE2	MPE PM1	MPE PM2	MPE AI
50	12,5	10	2,5		15,051500	15,051500	15,051500	15,051500	15,051500
50	12,5	10	3,5		15,051500	15,051500	15,051500	15,051500	15,051500
50	12,5	10	4,5		15,051500	15,051500	15,051500	15,051500	15,051500
50	25	10	2,5		15,051500	15,051500	15,051500	15,051500	15,051500
50	25	10	3,5		15,051500	15,051500	15,051500	15,051500	15,051500
50	25	10	4,5		15,051500	15,051500	15,051500	15,051500	15,051500
50	37,5	10	2,5	15,051500	15,051500	15,051500	15,051447	15,051447	15,051500
50	37,5	10	3,5		15,051500	15,051500	15,051498	15,051498	15,051500
50	37,5	10	4,5		15,051500	15,051500	15,051500	15,051500	15,051500
50	50	10	2,5	15,051473	15,051473	15,051473	15,051273	15,051114	15,051473
50	50	10	3,5	15,051500	15,051500	14,750470	15,051233	15,048679	15,051500
50	50	10	4,5		15,051500	14,750470	15,051499	15,048303	15,051500
100	12,5	10	2,5		30,103000	30,103000	30,103000	30,102999	30,103000
100	12,5	10	3,5		30,103000	30,103000	30,103000	30,102999	30,103000
100	12,5	10	4,5		30,103000	30,103000	30,103000	30,103000	30,103000
100	25	10	2,5		30,103000	30,103000	30,103000	30,103000	30,103000
100	25	10	3,5		30,103000	30,103000	30,103000	30,103000	30,103000
100	25	10	4,5		30,103000	30,103000	30,103000	30,103000	30,103000
100	37,5	10	2,5	30,103000	30,103000	30,103000	30,102996	30,102681	30,103000
100	37,5	10	3,5	30,103000	30,103000	30,103000	30,102680	30,102787	30,103000
100	37,5	10	4,5		30,103000	30,103000	30,103000	30,103000	30,103000
100	50	10	2,5		30,102955	30,102955	30,102620	30,102620	30,102955
100	50	10	3,5		30,102997	29,801970	30,102673	30,102673	30,102997
100	50	10	4,5		30,102999	30,102999	30,102979	30,102673	30,102999
200	12,5	10	2,5		60,205999	60,205997	60,205999	60,205999	60,205999
200	12,5	10	3,5		60,205999	60,205999	60,205999	60,205999	60,205999
200	12,5	10	4,5		60,205999	60,205999	60,205999	60,205999	60,205999
200	25	10	2,5		60,205997	60,205997	60,205999	60,205999	60,205999
200	25	10	3,5		60,205999	60,205999	60,205999	60,205999	60,205999
200	25	10	4,5		60,205999	60,205999	60,205999	60,205999	60,205999
200	37,5	10	2,5	60,205999	60,205997	60,205983	60,205999	60,205999	60,205999
200	37,5	10	3,5	60,205999	60,205997	60,205998	60,205999	60,205999	60,205999
200	37,5	10	4,5		60,205999	60,205574	60,205999	60,205999	60,205999
200	50	10	2,5		60,081022	60,081022	60,205620	60,204237	60,205954
200	50	10	3,5		60,081053	59,904969	60,205990	60,205990	60,205997
200	50	10	4,5		60,205568	60,202579	60,205992	60,205989	60,205999

**Tabla 7-11: Indicadores de la calidad de la asignación desde el punto de vista de la prioridad para los escenarios con 10 jornadas utilizadas**