

5 Resultados experimentales e interpretación

En este punto se van a exponer las dimensiones y los resultados obtenidos tras la resolución de una batería de problemas usando tres algoritmos distintos: *Simplex Primal*, *Simplex Dual* y *MILP* (este último, para los problemas que presentan variables continuas y discretas). Con los dos primeros algoritmos se resolverán los problemas de conductores individuales con planteamiento determinista y con planteamiento estocástico. Con el algoritmo *MILP*, se resolverán los problemas de conductores individuales y abonados con planteamiento determinista y con planteamiento estocástico. Esto es debido a que este algoritmo es el indicado para trabajar en problemas que presentan variables continuas y discretas (ya sean binarias o enteras). Se harán diversas comparativas con dichos resultados y se realizará una interpretación de los mismos.

Adicionalmente, y a modo de ejemplo, se mostrarán en el siguiente apartado todos los datos correspondientes a una serie de problemas de pequeñas dimensiones, para los que se representarán gráficamente las capacidades y demandas obtenidas aleatoriamente por el primero de los programas vistos en el apartado anterior, así como las soluciones obtenidas tras su resolución.

5.1 Problemas de pequeñas dimensiones

En primer lugar se ha de comentar que, para cerciorarse de que los resultados obtenidos tras la resolución de los modelos implementados en este proyecto usando los distintos algoritmos de los que dispone la herramienta ILOG CPLEX eran satisfactorios, se resolvieron previamente una serie de problemas de pequeño tamaño usando la utilidad *solver* de la hoja de cálculo Excel, limitada a problemas de hasta 200 variables.

Los resultados obtenidos para la función objetivo a través de estas técnicas en problemas de tamaño pequeño coincidieron con los que se obtuvieron con los modelos implementados en este proyecto. No obstante, algunos de los valores de las plazas a alquilar para cada hora, categoría y número de horas de estancia resultaron ser distintos en función de la técnica usada para la resolución del problema.

A continuación, se exponen los datos y resultados obtenidos en la resolución de una batería de cuatro problemas para un aparcamiento de tamaño pequeño (80 plazas) y tres categorías de conductores individuales. Estas categorías son: conductores normales, residentes y comerciantes

en la zona. Como ya se comentó en capítulos anteriores, los residentes y comerciantes son conductores individuales que tienen su lugar de residencia o de trabajo, respectivamente, en las cercanías del aparcamiento, y que han rellenado una solicitud para obtener unas tarjetas que les identifican como residentes o comerciantes. Ello les permite obtener un precio más económico que el de los conductores individuales normales, pero no significa que tengan una plaza de aparcamiento alquilada. El alquiler de una plaza se obtiene mediante un abono de un día, de cinco días o de 30 días. En el caso de poseer un abono, los conductores son considerados como abonados. La siguiente tabla (*tabla 5.1*) muestra los precios de las distintas categorías de conductores individuales o categorías individuales por hora.

Categorías Conductores Individuales	Franja Horaria	Precio (€)
Normal	Cara	1.50
	Barata	1.20
Residente	Cara	1.20
	Barata	0.96
Comerciante	Cara	0.96
	Barata	0.60

Tabla 5.1 Precios de las distintas categorías

En esta tabla podemos observar como los precios son distintos no sólo entre las distintas categorías, sino también según la franja horaria en la que la plaza del aparcamiento esté siendo ocupada. Trabajaremos con dos franjas horarias, cara y barata. Estas franjas horarias son datos que introducimos al programa en el fichero de entrada. En esta batería de problemas, la franja horaria cara va desde las 8:00 hasta las 14:00 horas y desde las 16:00 hasta las 19:00 horas, que se corresponden con horas en las que la demanda de plazas en el aparcamiento es grande. La franja horaria barata comprende el resto de las horas (desde las 00:00 hasta las 8:00 horas, desde las 14:00 hasta las 16:00 horas y desde las 19:00 hasta las 24:00 horas). Estos datos se muestran en la siguiente tabla (*tabla 5.2*). Por ejemplo, un residente que esté en el aparcamiento desde las 17:00 hasta las 19:00 horas pagará dos horas en franja horaria cara, es decir, 2.4 € (1.2 € + 1.2 €). En cambio, otro residente que esté en el aparcamiento desde las 18:00 hasta las 20:00 horas pagará una hora en franja horaria cara y otra en franja horaria barata, es decir, 2.16 € (1.2 € + 0.96 €).

Franja Horaria	Horario
Cara	8:00 – 14:00 y 16:00 – 19:00 Horas
Barata	00:00 – 8:00, 14:00 – 16:00 y 19:00 – 24:00 Horas

Tabla 5.2 Franjas horarias

Se han elegido para formar la batería de problemas cuatro problemas: dos, con una duración de un día (horizonte temporal de 24 horas), y otros dos, con una duración de cinco días (horizonte temporal de 120 horas). Estos problemas se resolverán con el programa para conductores individuales con planteamiento determinista.

Los ficheros de entrada a este programa, se obtienen a partir de otro programa que se encarga de generar, de forma aleatoria, las demandas y las capacidades horarias.

En la *tabla 5.3* se muestran los datos de entrada al problema que realiza la generación de capacidades y demandas:

Capacidad			80 Plazas		
Categorías Conductores Individuales			Normal	Residente	Comerciante
Problema	Nº Días	Precio (€)	1.50 / 1.20	1.20 / 0.96	0.96 / 0.60
EJ1	1	Estancias (Horas)	3	3	5
		Lím. Diurnos	0 / 20	0 / 15	0 / 8
		Lím. Nocturnos	0 / 2	0 / 3	0 / 2
EJ2	1	Estancias (Horas)	3	3	5
		Lím. Diurnos	0 / 8	0 / 5	0 / 4
		Lím. Nocturnos	0 / 1	0 / 1	0 / 1
EJ3	5	Estancias (Horas)	3	5	7
		Lím. Diurnos	0 / 20	0 / 15	0 / 8
		Lím. Nocturnos	0 / 2	0 / 3	0 / 2
EJ4	5	Estancias (Horas)	3	5	7
		Lím. Diurnos	0 / 8	0 / 5	0 / 4
		Lím. Nocturnos	0 / 1	0 / 1	0 / 1

Tabla 5.3 Datos de los problemas

Se puede observar en esta tabla que el número de estancias de cada una de las tres categorías individuales varía según el problema. Así, por ejemplo, en el problema EJ3 la estancia máxima para un conductor normal es de tres horas, para un residente de cinco horas y para un comerciante de siete horas. También podemos ver cómo para cada problema aparecen límites diurnos y límites nocturnos. Estos apartados hacen referencia a los valores mínimo y máximo de

la demanda para cada una de las categorías. Los límites diurnos son los que se usan para generar la demanda entre las horas 7:00 y las 20:00, y los nocturnos en las restantes horas. En el EJ2, la demanda para conductores normales entre las 9:00 y las 10:00 tomará un valor entre 0 y 8 para cada una de las horas de estancia. En cambio, entre las 3:00 y las 4:00, esta demanda tendrá un valor de 0 y 1 para cada una de las horas de estancia.

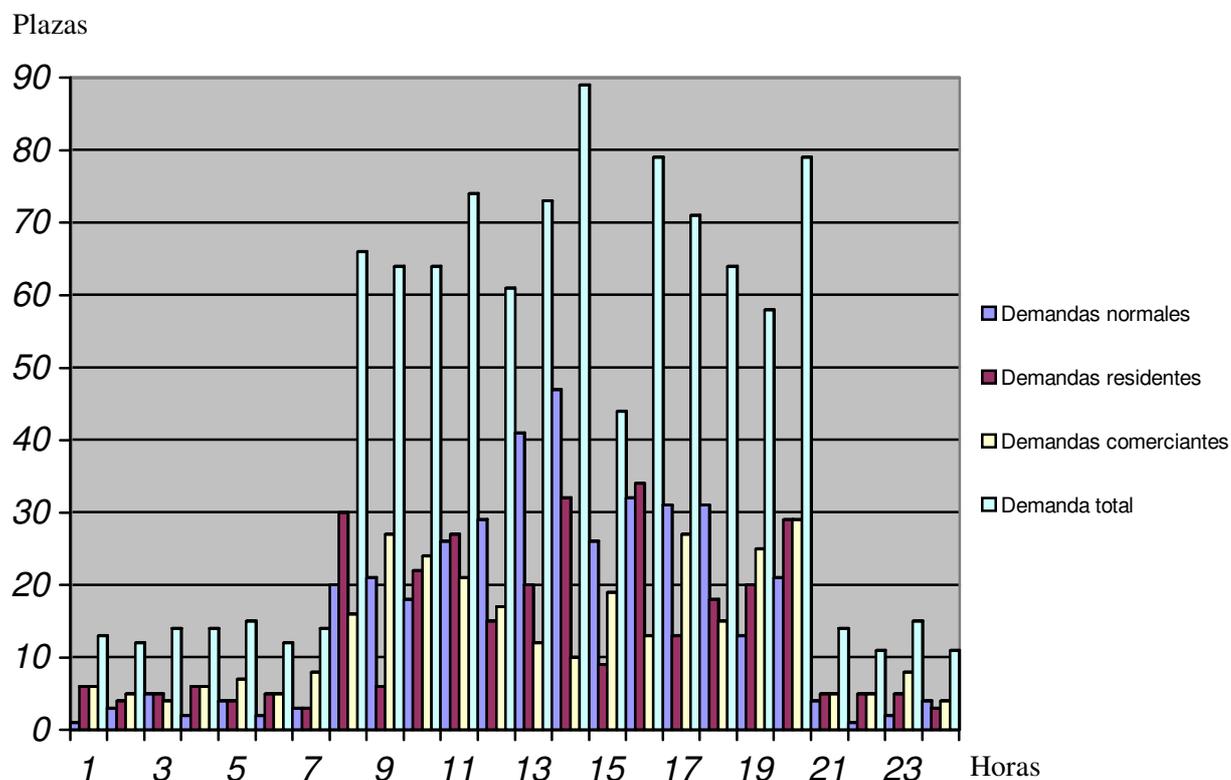
Los datos de la *tabla 5.3* se introdujeron en un fichero (un ejemplo del mismo se muestra en el ANEXO II), que fue la entrada al programa que genera las demandas para cada hora, categoría y horas de estancias de forma aleatoria (programa primero). También genera las capacidades horarias del aparcamiento (en estos ejemplos es siempre constante e igual a 80).

En la *tabla 5.4* se muestra a modo de ejemplo los valores de la distribución de demandas para cada hora, estancia y categoría obtenidas aleatoriamente tras la ejecución del programa primero para el problema EJ1.

Problema				EJ1							
Categoría	Normal			Residente			Comerciante				
Estancia (Horas)	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4	5
Hora 1	0	1	0	3	0	3	2	0	0	2	2
Hora 2	2	1	0	0	3	1	1	1	0	1	2
Hora 3	2	2	1	2	2	1	1	0	2	0	1
Hora 4	0	0	2	1	2	3	1	1	0	2	2
Hora 5	1	2	1	0	3	1	1	2	1	2	1
Hora 6	0	0	2	2	2	1	0	0	1	2	2
Hora 7	0	2	1	3	0	0	1	2	2	2	1
Hora 8	15	5	0	15	15	0	2	7	0	4	3
Hora 9	10	8	3	1	1	5	8	3	6	4	6
Hora 10	7	10	1	12	6	4	0	8	5	6	5
Hora 11	3	20	3	3	9	15	3	8	5	0	5
Hora 12	11	6	12	8	4	3	1	2	4	8	2
Hora 13	17	14	10	11	7	2	3	1	2	0	6
Hora 14	20	20	7	14	12	6	0	0	5	0	5
Hora 15	10	11	5	1	1	7	6	1	8	1	3
Hora 16	18	3	11	15	7	12	0	1	4	2	6
Hora 17	5	14	12	0	11	2	6	4	1	8	8
Hora 18	9	15	7	0	3	15	2	8	1	2	2
Hora 19	2	3	8	6	0	14	3	8	2	5	7
Hora 20	7	4	10	12	11	6	6	8	8	6	1
Hora 21	2	0	2	1	2	2	2	1	0	2	0
Hora 22	1	0	0	1	3	1	1	1	0	2	1
Hora 23	0	0	2	2	2	1	2	2	0	2	2
Hora 24	1	1	2	2	0	1	2	0	1	0	1

Tabla 5.4 Demandas aleatorias para el problema EJ1

En la siguiente gráfica (*gráfica 5.1*), se muestran de nuevo los valores de las demandas frente a la demanda total, para que se puedan interpretar con mayor facilidad. Se puede observar cómo en las horas en las que se ha generado la demanda usando los límites diurnos (de 7:00 a 20:00), la demanda es mucho mayor que en las horas en las que se han utilizado los límites nocturnos.



Gráfica 5.1 Demandas aleatorias para el problema EJI

A partir de estos datos se obtienen las soluciones de los problemas tras la ejecución de los programas mencionados anteriormente con ILOG CPLEX. Las soluciones obtenidas tras la resolución con los diversos algoritmos comentados se muestran en la *tabla 5.5* para los cuatro problemas introducidos. En esta tabla también aparece junto a la solución final (beneficio obtenido en €), el número de iteraciones que fueron necesarias para llegar a la misma, y los tiempos de ejecución (en segundos) de los algoritmos. Como se puede apreciar, el valor de la solución final de cada uno de los cuatro problemas, es independientemente del algoritmo usado. Sin embargo, los tiempos y el número de iteraciones empleados para alcanzarla si que varían de un algoritmo a otro.

Problema	Algoritmo	Tiempo (segundos)	Nº Iteraciones	Solución (€)
EJ1	Dual	0.031	37	1706.34
	Primal	0.015	136	1706.34
EJ2	Dual	0.015	0	1097.10
	Primal	0.015	0	1097.10
EJ3	Dual	0.046	217	9897.42
	Primal	0.031	1040	9897.42
EJ4	Dual	0.031	160	7275.96
	Primal	0.015	907	7275.96

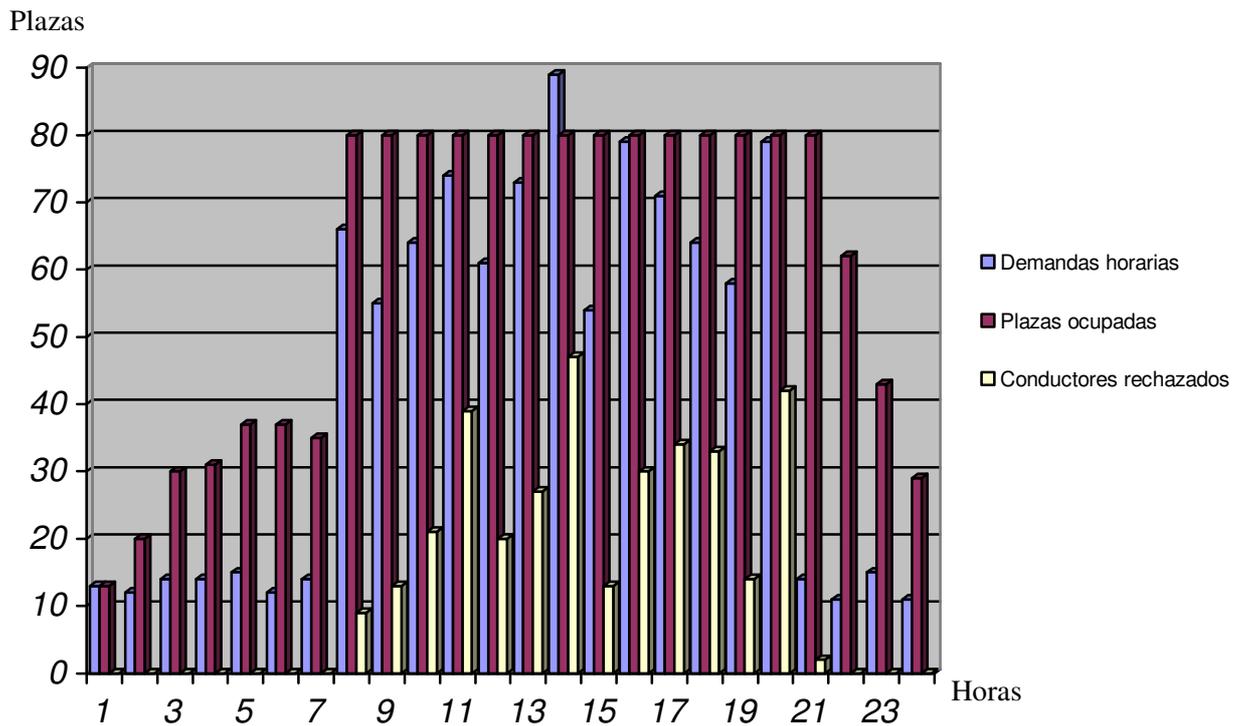
Tabla 5.5 Resultados de los problemas

Los valores de las soluciones para cada hora, categoría y número de horas de estancia, se muestran igualmente tras resolver el problema por los diversos algoritmos, en un fichero de salida, que se contempla en el ANEXO II. Para el problema EJ1 estos valores se muestran en la *tabla 5.6*.

Problema				EJ1							
Categoría	Normal			Residente			Comerciante				
Estancia (Horas)	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4	5
Hora 1	0	1	0	3	0	3	2	0	0	2	2
Hora 2	2	1	0	0	3	1	1	1	0	1	2
Hora 3	2	2	1	2	2	1	1	0	2	0	1
Hora 4	0	0	2	1	2	3	1	1	0	2	2
Hora 5	1	2	1	0	3	1	1	2	1	2	1
Hora 6	0	0	2	2	2	1	0	0	1	2	2
Hora 7	0	2	1	3	0	0	1	2	2	2	1
Hora 8	15	5	0	15	15	0	0	3	0	4	0
Hora 9	10	8	3	1	1	5	3	3	6	2	0
Hora 10	7	10	1	12	6	4	0	3	0	0	0
Hora 11	3	20	3	0	0	9	0	0	0	0	0
Hora 12	11	6	12	8	4	0	0	0	0	0	0
Hora 13	17	14	10	3	0	2	0	0	0	0	0
Hora 14	15	20	7	0	0	0	0	0	0	0	0
Hora 15	10	11	5	1	1	7	6	0	0	0	0
Hora 16	18	3	11	0	7	10	0	0	0	0	0
Hora 17	5	14	12	0	0	2	4	0	0	0	0
Hora 18	9	15	7	0	0	0	0	0	0	0	0
Hora 19	2	3	8	6	0	14	0	0	0	4	7
Hora 20	2	4	10	0	0	6	0	0	8	6	1
Hora 21	2	0	2	1	2	2	0	1	0	2	0
Hora 22	1	0	0	1	3	1	1	1	0	2	1
Hora 23	0	0	2	2	2	1	2	2	0	2	2
Hora 24	1	1	2	2	0	1	2	0	1	0	1

Tabla 5.6 Soluciones para el problema EJ1

Para poder observar con mayor claridad la relación entre las demandas totales horarias, los conductores rechazados y las plazas ocupadas en el aparcamiento, se ilustra la siguiente gráfica (*gráfica 5.2*), que corresponde al problema EJ1. Las demandas horarias totales se corresponden con el número de plazas para las distintas categorías y horas de estancias que son solicitadas cada hora. Como se puede observar, desde la hora 8 hasta la hora 21, las plazas ocupadas en el aparcamiento son 80, lo que significa que la totalidad del aparcamiento está lleno. Por este motivo, el número de conductores rechazados durante estas horas será mayor.



Gráfica 5.2 Demandas y plazas para el problema EJ1

Finalmente se van a representar los valores de los precios *duales* para las restricciones de capacidad. Estos valores se obtienen tras resolver los problemas usando los algoritmos *Primal* o *Dual*. Los valores de las variables *duales* indican el precio que debería tener una plaza adicional a las ya ocupadas, asumiendo que la capacidad del aparcamiento se pueda incrementar en una unidad. Si un conductor ofrece un precio por una plaza superior al precio *dual*, es decir, el precio de la categoría demandada por el conductor es superior al precio *dual* de esa hora, la plaza se ocupará. En caso contrario no, pues la categoría permanecerá cerrada. Todo esto se puede apreciar con mayor claridad en la *tabla 5.7*, en ella se representan los precios *duales* horarios correspondientes al problema EJ1.

Problema	EJ1
Hora	Precio Dual (€)
1	0.00
2	0.00
3	0.00
4	0.00
5	0.00
6	0.00
7	0.00
8	0.72
9	0.90
10	0.90
11	1.50
12	0.90
13	1.20
14	1.50
15	0.96
16	0.96
17	0.90
18	1.50
19	0.90
20	1.20
21	0.96
22	0.00
23	0.00
24	0.00

Tabla 5.7 Precios duales horarios para el problema EJ1

En la *tabla 5.7* se puede apreciar cómo los precios duales correspondientes a las siete primeras horas y a las tres últimas horas estudiadas son nulos, es decir, siempre se admitiría a un nuevo conductor. El motivo de esto es que la suma total de las demandas de plazas para estas horas es inferior a la capacidad, por lo que tras ocuparse todas las plazas demandadas, aún quedarían algunas libres y, por tanto, el coste de alquilar una más sería nulo. En la gráfica anterior (*gráfica 5.2*), se puede observar cómo, en efecto, el número de plazas ocupadas es menor que la capacidad total en las horas en las que el precio dual es cero. Un caso extremo de esta situación ocurre en el problema EJ2. En él, la distribución de demandas generadas ha sido tal que, para todas las horas, la demanda total se ha mantenido por debajo de la capacidad del aparcamiento, por lo que todas las plazas demandadas han sido ocupadas cada hora y aún así han quedado plazas vacías, por lo que todos los precios duales serán nulos.

5.2 Modelos a resolver

Para resolver los distintos problemas que abarca este proyecto, se ha trabajado con cuatro modelos distintos, como se comentó en el *capítulo 3*. Los cuatro modelos a resolver son los siguientes:

- 1) Conductores individuales con planteamiento determinista.
- 2) Conductores individuales y abonados con planteamiento determinista.
- 3) Conductores individuales con planteamiento estocástico.
- 4) Conductores individuales y abonados con planteamiento estocástico.

Estos modelos han sido resueltos utilizando siete programas. Los programas primero y segundo realizan la generación de las capacidades horarias del aparcamiento, las demandas horarias y los grupos de abonados. Los programas tercero, cuarto, quinto y sexto resolverán los modelos de conductores individuales con planteamiento determinista, conductores individuales y abonados con planteamiento determinista, conductores individuales con planteamiento estocástico, y conductores individuales y abonados con planteamiento estocástico, respectivamente. El programa séptimo (se estudiará en el *apartado 5.6*) obtendrá, para el planteamiento determinista, el precio mínimo para un grupo de abonados a partir del cual es rentable aceptarlos. En la siguiente tabla (*tabla 5.8*) se pueden observar los distintos modelos resueltos, así como sus características.

Modelos	Conductores Individuales	Abonados	Planteamiento	
			Determinista	Estocástico
1	SI	NO	SI	NO
2	SI	SI	SI	NO
3	SI	NO	NO	SI
4	SI	SI	NO	SI

Tabla 5.8 Modelos a resolver

5.3 Generación de problemas. Datos de los modelos

Para poder trabajar con los programas que resuelven los modelos comentados en el apartado anterior, es necesario generar los datos que estos programas necesitan. De este cometido se encargan los programas primero y segundo. A continuación, se expondrán los datos de entrada necesarios para la ejecución del primero de estos dos programas:

Programa primero: Generación aleatoria de datos de conductores individuales.

- Número de días.
- Número de categorías individuales.
- Estancias máximas para las categorías individuales.
- Precio para la primera categoría en franja horaria barata y cara.
- Precio para la segunda categoría en franja horaria barata y cara.
- Precio para la tercera categoría en franja horaria barata y cara.
- Franjas horarias con precio caro.
- Límites de demanda para cada categoría en horario diurno.
- Límites de demanda para cada categoría en horario nocturno.
- Capacidad mínima.
- Capacidad máxima.
- Probabilidades de los distintos escenarios estocásticos.

Para trabajar con este programa, se ha utilizado una batería de ocho problemas. Estos ocho problemas se introdujeron en el programa primero, generando otros ocho ficheros de salida respectivamente. Los ficheros de salida contendrán entre otros datos, las capacidades horarias, las demandas para el planteamiento estocástico, así como las demandas para el planteamiento determinista, y serán la primera de las entradas al programa segundo (generación de abonados). Estos datos son los datos de los conductores individuales que necesitamos para resolver, posteriormente, los distintos modelos.

Para la realización de los diferentes problemas, hemos trabajado con un número de días de estudio igual a 30 (horizonte temporal de 720 horas), capacidad horaria del aparcamiento constante e igual a 250 plazas y un número de categorías individuales igual a tres (conductores individuales: normales, residentes y comerciantes).

La siguiente tabla (*tabla 5.9*) muestra los precios de las distintas categorías individuales en las distintas franjas horarias (cara y barata).

Categorías Conductores Individuales	Franja Horaria	Precio (€)
Normal	Cara	1.50
	Barata	1.20
Residente	Cara	1.20
	Barata	0.96
Comerciante	Cara	0.96
	Barata	0.60

Tabla 5.9 Precios de las distintas categorías

La franja horaria cara de esta batería de problemas va desde las 8:00 hasta las 14:00 horas y desde las 16:00 hasta las 19:00 horas, y la franja horaria barata el resto de horas, es decir, desde las 00:00 hasta las 8:00 horas, desde las 14:00 hasta las 16:00 horas y desde las 19:00 hasta las 24:00 horas.

La siguiente tabla (*tabla 5.10*) muestra las estancias máximas y los límites para la generación de demandas para cada una de las categorías individuales en cada uno de los problemas.

Problema	Estancias (Horas)			Límites Demandas					
	Normal	Resid.	Comer.	Día			Noche		
				Normal	Resid.	Comer.	Normal	Resid.	Comer.
1	3	3	7	0 / 12	0 / 8	0 / 5	0 / 1	0 / 2	0 / 1
2	3	5	7	0 / 12	0 / 8	0 / 5	0 / 1	0 / 2	0 / 1
3	5	5	7	0 / 12	0 / 8	0 / 5	0 / 1	0 / 2	0 / 1
4	5	7	7	0 / 12	0 / 8	0 / 5	0 / 1	0 / 2	0 / 1
5	3	3	7	0 / 20	0 / 15	0 / 8	0 / 2	0 / 3	0 / 2
6	3	5	7	0 / 20	0 / 15	0 / 8	0 / 2	0 / 3	0 / 2
7	5	5	7	0 / 20	0 / 15	0 / 8	0 / 2	0 / 3	0 / 2
8	5	7	7	0 / 20	0 / 15	0 / 8	0 / 2	0 / 3	0 / 2

Tabla 5.10 Estancias máximas y límites de demandas

En la columna “Estancias”, tenemos las horas máximas de estancia estimadas para cada conductor de cada categoría individual. Por ejemplo, en el problema 1, la estancia máxima para los conductores normales será de tres horas, para los residentes también será de tres horas, y para los comerciantes será de siete horas. Por otro lado, en la columna “Límites Demandas”, tenemos los límites de distribución de demandas en horario diurno y nocturno para cada

categoría individual. Los límites diurnos son los que se usan para generar la demanda entre las horas 7:00 y las 20:00 horas, y los nocturnos en las restantes horas.

Por último, este programa también tiene en cuenta el número de escenarios con los que se trabaja en el planteamiento estocástico y sus distintas probabilidades. Para ello, hemos trabajado en tres casos distintos (cada uno con tres escenarios estocásticos) que se diferencian entre sí en las probabilidades de los distintos escenarios estocásticos. Estos tres distintos casos se muestran en la siguiente tabla (*tabla 5.11*):

	Nº Escenarios Estocásticos	Probabilidades
Primer Caso	3	0.8, 0.6, 0.4
Segundo Caso	3	0.7, 0.5, 0.3
Tercer Caso	3	0.6, 0.4, 0.2

Tabla 5.11 Escenarios estocásticos y probabilidades

A continuación se exponen los datos de entrada necesarios para la ejecución del segundo de los programas:

Programa segundo: Generación aleatoria de datos de grupos de abonados.

Primera entrada (datos de los conductores individuales):

- Número de días.
- Número de categorías individuales.
- Estancias máximas para las categorías individuales.
- Precio para la primera categoría en franja horaria barata y cara.
- Precio para la segunda categoría en franja horaria barata y cara.
- Precio para la tercera categoría en franja horaria barata y cara.
- Franjas horarias con precio caro.
- Demandas generadas para el planteamiento determinista.
- Demandas generadas para el planteamiento estocástico.
- Capacidades horarias generadas.
- Probabilidades de los distintos escenarios estocásticos.

Segunda entrada (datos para la generación de los abonados):

- Estancias de los distintos tipos de grupo de abonados.
- Precio de los distintos abonos.
- Límites para la generación del tamaño de los grupos de abonados de cada tipo.
- Límites para el número de grupos de abonados de cada tipo.

Este programa generará los ficheros de salida que serán la entrada de los programas tercero, cuarto, quinto, sexto y séptimo.

Para trabajar con este programa necesitamos dos ficheros de entrada. El primero de ellos, con los datos de los conductores individuales, es el que nos proporciona como salida el programa primero. En él aparecen ya las distintas demandas y capacidades generadas aleatoriamente, y el resto de datos son los que acabamos de explicar para el programa primero. El segundo de los ficheros de entrada es el que tiene los datos necesarios para poder generar de forma aleatoria a los abonados.

Como ya hemos mencionado en otros capítulos anteriores, hay tres tipos de abonos:

- 1) Abono diario, alquiler de una plaza de aparcamiento para una estancia de un día (24 horas naturales). El precio total de este abono es de 12.5 €.
- 2) Abono para cinco días laborables (de lunes a viernes), alquiler de una plaza de aparcamiento para una estancia de cinco días. El precio total de este abono es de 45 €.
- 3) Abono mensual (30 días), alquiler de una plaza de aparcamiento para una estancia de 30 días. El precio total de este abono es de 160 €.

Para generar los distintos tipos de abonados hemos trabajado con otra nueva batería de problemas. Esta batería de problemas consta de tres problemas que reciben el nombre de “Abonados Bajo”, “Abonados Medio” y “Abonados Alto”. Estos 3 problemas difieren entre sí en la cantidad de abonados que se generan de forma aleatoria. Con el problema “Abonados Bajo” se generará un número de grupos de abonados bajo: de 2 a 4 grupos de abonados diarios, de 3 a 5 grupos de abonados para cinco días laborables, y un solo grupos de abonados mensuales. Con el problema “Abonados Medio” el número de grupos de abonados generados será medio: de 4 a 6 grupos de abonados diarios, de 5 a 8 grupos de abonados para cinco días laborables, y de 1 a 2 grupos de abonados mensuales. Finalmente, con el problema “Abonados Alto” el número de grupos de abonados generados será elevado: de 6 a 8 grupos de abonados

diarios, de 8 a 11 grupos de abonados para cinco días laborables, y de 2 a 3 grupos de abonados mensuales.

La siguiente tabla (*tabla 5.12*) muestra estos datos, así como los límites para el tamaño y el número de los distintos grupos de abonados para cada uno de los problemas.

Problema	Abono	Estancia (Días)	Precio (€)	Tamaño Grupos	Nº Grupos
Abonados Bajo	1 Día	1	12.5	1 / 2	2 / 4
	5 Días	5	45.0	1 / 4	3 / 5
	30 Días	30	160.0	1 / 2	1 / 1
Abonados Medio	1 Día	1	12.5	1 / 2	4 / 6
	5 Días	5	45.0	1 / 4	5 / 8
	30 Días	30	160.0	1 / 2	1 / 2
Abonados Alto	1 Día	1	12.5	1 / 2	6 / 8
	5 Días	5	45.0	1 / 4	8 / 11
	30 Días	30	160.0	1 / 2	2 / 3

Tabla 5.12 Datos para crear a los abonados

A continuación, se van a presentar, como muestra, las características de los grupos generados para el problema 1, haciendo uso de los datos mostrados en la *tabla 5.12*:

Problema 1:

Resultado de la generación de los abonados
<u>Abonados Bajo</u>
Número de grupos: [2, 4, 1]
Tamaño: [[1, 1], [1, 2, 2, 2], [2]]
Estancias: [1, 5, 30]
Día de llegada: [[12, 16], [22, 8, 1, 15], [1]]
Precio: [12.5, 45, 160]
<u>Abonados Medio</u>
Número de grupos: [4, 5, 1]
Tamaño: [[1, 1, 2, 1], [3, 4, 1, 2, 2], [1]]
Estancias: [1, 5, 30]
Día de llegada: [[3, 18, 2, 4], [22, 15, 22, 15, 1], [1]]
Precio: [12.5, 45, 160]
<u>Abonados Alto</u>
Número de grupos: [6, 9, 3]
Tamaño: [[1, 2, 1, 2, 2, 2], [2, 3, 4, 4, 3, 1, 3, 1, 3], [2, 2, 2]]
Estancias: [1, 5, 30]
Día de llegada: [[10, 10, 20, 30, 24, 22], [8, 22, 1, 22, 22, 22, 15, 15, 22], [1, 1, 1]]
Precio: [12.5, 45, 160]

5.4 Resultados experimentales

En este apartado mostraremos los resultados proporcionados por los programas tercero, cuarto, quinto y sexto, al trabajar con la batería de problemas explicada en el *apartado 5.3*. Estos programas trabajan con los modelos para conductores individuales con planteamiento determinista, conductores individuales y abonados con planteamiento determinista, conductores individuales con planteamiento estocástico, y conductores individuales y abonados con planteamiento estocástico, respectivamente.

5.4.1 Conductores individuales, planteamiento determinista. Resultados

El programa tercero es el que nos muestra los resultados para conductores individuales con planteamiento determinista. El fichero de entrada a este programa nos lo proporciona el segundo programa y presenta los siguientes datos:

Programa tercero: Conductores individuales con planteamiento determinista.

- Número de días.
- Número de categorías individuales.
- Estancias máximas para las categorías individuales.
- Precio para la primera categoría en franja horaria barata y cara.
- Precio para la segunda categoría en franja horaria barata y cara.
- Precio para la tercera categoría en franja horaria barata y cara.
- Franjas horarias con precio caro.
- Demandas generadas para el planteamiento determinista.
- Capacidades horarias generadas.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación (*tabla 5.13*):

Problema	Determinista (Primal)			Determinista (Dual)		
	F.O. (€)	Iteraciones	Tiempo (s)	F.O. (€)	Iteraciones	Tiempo (s)
1	59599	826	0'55	59599	1064	1'05
2	60301	901	0'55	60301	1025	1'37
3	60223	841	0'77	60223	1093	1'26
4	60381	1229	2'52	60381	1049	4'61
5	60514	701	0'66	60514	879	0'93
6	60421	819	0'49	60421	935	1'05
7	60486	819	0'55	60486	919	1'10
8	60584	886	0'88	60584	985	1'82

Tabla 5.13 Conductores individuales con planteamiento determinista

En esta tabla se muestra, para cada uno de los problemas, el valor de la función objetivo, el número de iteraciones y el tiempo empleado en la resolución de cada problema, para los algoritmos de resolución *Simplex Primal* y *Simplex Dual*.

5.4.2 Conductores individuales y abonados, planteamiento determinista. Resultados

El programa cuarto nos muestra los resultados para conductores individuales y abonados con planteamiento determinista. El fichero de entrada a este programa nos lo proporciona el segundo programa y presenta los siguientes datos:

Programa cuarto: Conductores individuales y abonados con planteamiento determinista.

- Número de días.
- Número de categorías individuales.
- Estancias máximas para las categorías individuales.
- Precio para la primera categoría en franja horaria barata y cara.
- Precio para la segunda categoría en franja horaria barata y cara.
- Precio para la tercera categoría en franja horaria barata y cara.
- Franjas horarias con precio caro.
- Demandas generadas para el planteamiento determinista.
- Capacidades horarias generadas.

- Estancias de los distintos tipos de grupo de abonados.
- Precio de los distintos tipos de grupo de abonados.
- Número de grupos de abonados de cada tipo de generados.
- Día de llegada de cada grupo de abonados.
- Hora de llegada de cada grupo de abonados.
- Tamaño de cada grupo de abonados.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación (*tabla 5.14*):

Problema	Abonados Bajo			Abonados Medio			Abonados Alto		
	F. O. (€)	Iteraciones	Tiempo (s)	F. O. (€)	Iteraciones	Tiempo (s)	F. O. (€)	Iteraciones	Tiempo (s)
1	59633	1208	2,47	59694	1610	1'76	59706	1607	1'26
2	60322	1330	1'21	60373	1468	1'27	60404	1521	1'27
3	60229	1435	1'43	60277	1400	1'26	60301	1748	1'48
4	60405	1043	1'86	60435	1467	2'25	60459	1545	2'25
5	60526	960	0'88	60604	1195	0'93	60635	1184	0'94
6	60475	1228	1'15	60493	1150	0'99	60505	1414	1'20
7	60492	1045	1'15	60594	1100	1'16	60643	1436	1'32
8	60599	982	1'76	60656	991	1'70	60686	1264	2'03

Tabla 5.14 Conductores individuales y abonados con planteamiento determinista

5.4.3 Conductores individuales, planteamiento estocástico. Resultados

El programa quinto nos muestra los resultados para conductores individuales con planteamiento estocástico. El fichero de entrada a este programa nos lo proporciona el segundo programa y presenta los siguientes datos:

Programa quinto: Conductores individuales con planteamiento estocástico.

- Número de días.
- Número de categorías individuales.
- Estancias máximas para las categorías individuales.
- Precio para la primera categoría en franja horaria barata y cara.
- Precio para la segunda categoría en franja horaria barata y cara.
- Precio para la tercera categoría en franja horaria barata y cara.
- Franjas horarias con precio caro.

- Demandas generadas para el planteamiento estocástico.
- Capacidades horarias generadas.
- Probabilidades de los distintos escenarios estocásticos.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación (*tabla 5.15* y *tabla 5.16*):

Problema	Estocástico (0'8, 0'6, 0'4)			Estocástico (0'6, 0'4, 0'2)			Estocástico (0'7, 0'5, 0'3)		
	F.O. (€)	Iteraciones	Tiempo (s)	F.O. (€)	Iteraciones	Tiempo (s)	F.O. (€)	Iteraciones	Tiempo (s)
1	59462	1926	2'30	59063	2019	1'98	59295	2353	2'25
2	60120	2529	2'36	59733	2167	2'36	60005	2728	3'02
3	59945	2206	2'31	59831	2339	2'03	59897	3161	2'80
4	60169	2888	3'14	59867	2503	3'46	60127	2924	3'79
5	60359	1786	2'30	60189	1846	2'53	60310	2099	3'07
6	60179	2214	2'69	60088	1885	2'09	60137	2410	2'48
7	60207	1985	1'87	60207	1908	2'03	60207	2477	2'41
8	60244	2448	2'91	60208	2172	3'14	60208	2307	3'08

Tabla 5.15 Conductores individuales con planteamiento estocástico (Primal)

Problema	Estocástico (0'8, 0'6, 0'4)			Estocástico (0'6, 0'4, 0'2)			Estocástico (0'7, 0'5, 0'3)		
	F.O. (€)	Iteraciones	Tiempo (s)	F.O. (€)	Iteraciones	Tiempo (s)	F.O. (€)	Iteraciones	Tiempo (s)
1	59462	1167	4'39	59063	1126	4'12	59295	1146	4'94
2	60120	1123	3'73	59733	1020	3'79	60005	1120	4'07
3	59945	1167	4'01	59831	1052	3'90	59897	1113	4'51
4	60169	1080	5'27	59867	1139	6'20	60127	1023	6'15
5	60359	979	6'65	60189	983	4'99	60310	1028	4'01
6	60179	1013	3'46	60088	903	3'79	60137	994	3'95
7	60207	1026	3'85	60207	995	3'73	60207	976	4'29
8	60244	1055	5'33	60208	958	5'65	60208	1065	6'26

Tabla 5.16 Conductores individuales con planteamiento estocástico (Dual)

En la *tabla 5.15* aparecen los resultados obtenidos utilizando el algoritmo de resolución *Simplex Primal*. En la *tabla 5.16* se muestran los resultados alcanzados utilizando el algoritmo de resolución *Simplex Dual*.

5.4.4 Conductores individuales y abonados, planteamiento estocástico.

Resultados

El programa sexto nos muestra los resultados para conductores individuales y abonados con planteamiento estocástico. El fichero de entrada a este programa nos lo proporciona el segundo programa y presenta los siguientes datos:

Programa sexto: Conductores individuales y abonados con planteamiento estocástico.

- Número de días.
- Número de categorías individuales.
- Estancias máximas para las categorías individuales.
- Precio para la primera categoría en franja horaria barata y cara.
- Precio para la segunda categoría en franja horaria barata y cara.
- Precio para la tercera categoría en franja horaria barata y cara.
- Franjas horarias con precio caro.
- Demandas generadas para el planteamiento estocástico.
- Capacidades horarias generadas.
- Estancias de los distintos tipos de grupo de abonados.
- Precio de los distintos tipos de grupo de abonados.
- Número de grupos de abonados de cada tipo generados.
- Día de llegada de cada grupo de abonados.
- Hora de llegada de cada grupo de abonados.
- Tamaño de cada grupo de abonados.
- Probabilidades de los distintos escenarios estocásticos.

Los resultados obtenidos se pueden observar en la siguiente tabla (*tabla 5.17*):

Problema	Abonados Estocástico (0'8, 0'6, 0'4)			Abonados Estocástico (0'6, 0'4, 0'2)			Abonados Estocástico (0'7, 0'5, 0'3)		
	F.O. (€)	Iteraciones	Tiempo (s)	F.O. (€)	Iteraciones	Tiempo (s)	F.O. (€)	Iteraciones	Tiempo (s)
1	59508	3236	3'32	59239	3606	3'19	59383	4153	3'68
2	60180	3537	3'75	60050	3185	4'26	60150	3860	3'97
3	60038	3290	2'70	59902	3635	2'86	59923	4592	3'83
4	60100	2127	3'69	60012	2625	4'01	60081	3022	4'68
5	60402	2581	2'96	60301	2808	3'04	60320	3107	2'54
6	60248	2691	4'81	60150	2335	2'71	60200	2967	4'24
7	60354	2296	3'93	60312	2203	2'39	60320	2864	4'53
8	60429	2240	3'74	60343	2032	4'18	60376	2230	3'87

Tabla 5.17 Conductores individuales y abonados con planteamiento estocástico

En esta tabla se muestran los resultados obtenidos utilizando el problema “Abonados Medio”. Se podrían haber tomado los valores generados por los problemas “Abonados Bajo” o “Abonados Alto”, pero los resultados son similares y las conclusiones a las que se llegan son las mismas.

5.5 Interpretación de los resultados

En este apartado vamos a interpretar y sacar conclusiones de los resultados obtenidos en el *apartado 5.4*. Para ello vamos a hacer una serie de comparaciones. Estas comparativas se harán desde el punto de vista del valor de la función objetivo (*apartado 5.5.1*), los tiempos de ejecución (*apartado 5.5.2*) y el número de iteraciones (*apartado 5.5.3*). Estas comparativas serán:

- 1) Conductores individuales con planteamiento determinista frente a conductores individuales con planteamiento estocástico.
- 2) Conductores individuales con planteamiento determinista frente a conductores individuales y abonados con planteamiento determinista.
- 3) Conductores individuales y abonados con planteamiento determinista frente a conductores individuales y abonados con planteamiento estocástico.
- 4) Conductores individuales con planteamiento estocástico frente a conductores individuales y abonados con planteamiento estocástico.

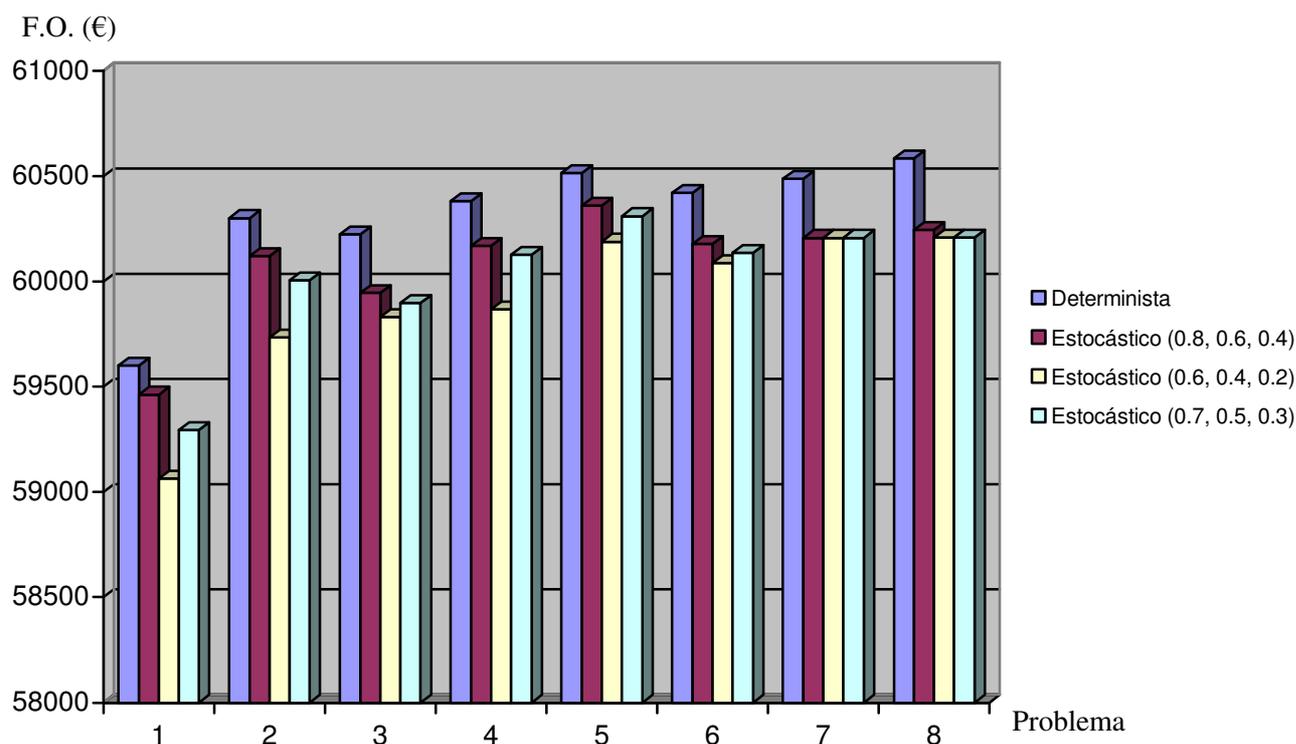
5.5.1 Comparación de los valores de la función objetivo

A continuación, para cada una de las cuatro comparativas, se expondrán en unas tablas (*tabla 5.18*, *tabla 5.19*, *tabla 5.20* y *tabla 5.21*) los resultados de la función objetivo obtenidos tras la resolución de cada programa. También se mostrarán los resultados en gráficas (*gráfica 5.3*, *gráfica 5.4*, *gráfica 5.5* y *gráfica 5.6*) con el fin de poder interpretarlos más fácilmente. Las gráficas representan, en el eje de abscisas, cada uno de los ocho problemas y, en el eje de ordenadas, el valor de la función objetivo en euros. Las columnas de cada uno de los problemas en las gráficas coinciden con las columnas de las tablas.

5.5.1.1 Conductores individuales con planteamiento determinista frente a conductores individuales con planteamiento estocástico. Función objetivo

	Determinista	(0.8, 0.6, 0.4)	(0.6, 0.4, 0.2)	(0.7, 0.5, 0.3)
Problema	F.O. (€)	F.O. (€)	F.O. (€)	F.O. (€)
1	59599	59462	59063	59295
2	60301	60120	59733	60005
3	60223	59945	59831	59897
4	60381	60169	59867	60127
5	60514	60359	60189	60310
6	60421	60179	60088	60137
7	60486	60207	60207	60207
8	60584	60244	60208	60208

Tabla 5.18 Individuales deterministas frente a individuales estocásticos (F.O.)



Gráfica 5.3 Individuales deterministas frente a individuales estocásticos (F.O.)

Para todos los problemas podemos apreciar que el valor de la función objetivo para el caso determinista es mayor que para los casos estocásticos. Como se comentó en el capítulo 3, la programación estocástica define esta diferencia (solución^{DP} - solución^{SP}) como el valor esperado de la información perfecta (EVPI), representando la pérdida de ingresos debida a la presencia de

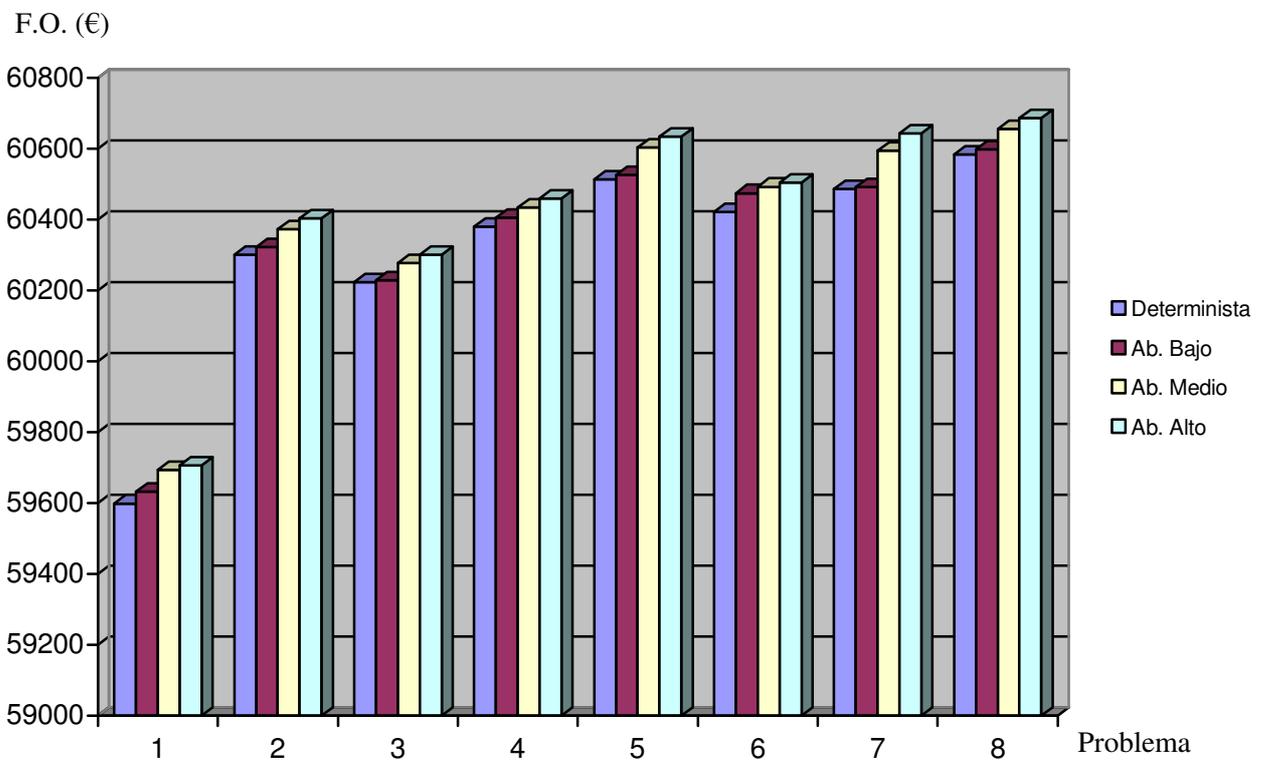
incertidumbre en el modelo estocástico respecto al modelo determinista. Sería la cantidad dispuesta a pagar para asegurarse el número de conductores futuros con certeza.

5.5.1.2 Conductores individuales con planteamiento determinista frente a conductores individuales y abonados con planteamiento determinista.

Función objetivo

	Determinista	Ab. Bajo	Ab. Medio	Ab. Alto
Problema	F.O. (€)	F.O. (€)	F.O. (€)	F.O. (€)
1	59599	59633	59694	59706
2	60301	60322	60373	60404
3	60223	60229	60277	60301
4	60381	60405	60435	60459
5	60514	60526	60604	60635
6	60421	60475	60493	60505
7	60486	60492	60594	60643
8	60584	60599	60656	60686

Tabla 5.19 Individuales deterministas frente a individuales y abonados deterministas (F.O.)



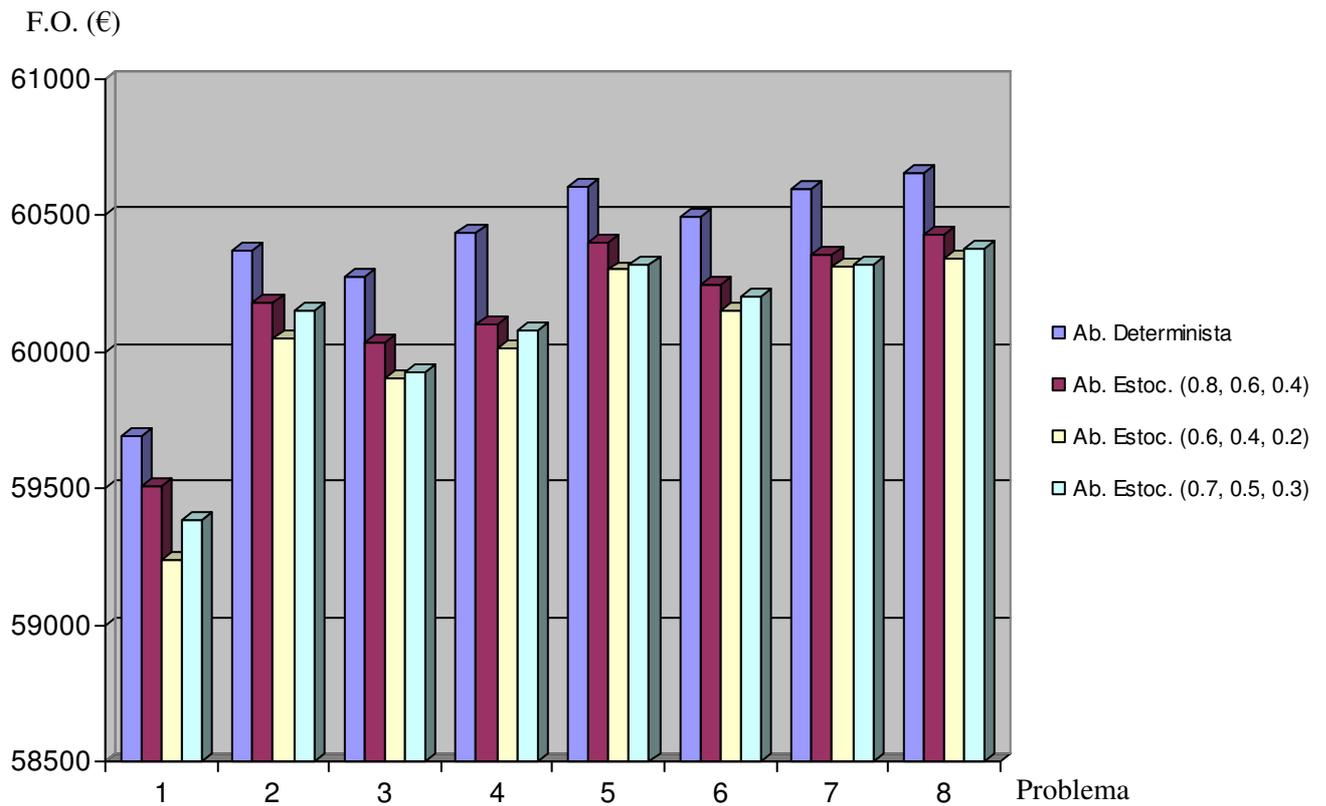
Gráfica 5.4 Individuales deterministas frente a individuales y abonados deterministas (F.O.)

A la vista de los resultados, y como era de esperar, la aparición de abonados hace que el valor de la función objetivo se vea incrementada. Un grupo de abonados es un conjunto de conductores que pretenden alquilar una plaza de aparcamiento durante las mismas horas. Si esta nueva situación mejora los ingresos que había únicamente con conductores individuales, el grupo de abonados es aceptado. Por el contrario, si los ingresos disminuyen, el grupo no es aceptado y tendremos el mismo valor que en la situación de conductores individuales. Podemos concluir que la incorporación de abonados a nuestro problema aumenta los ingresos (si es aceptado al menos un grupo) o los mantiene igual (si ningún grupo es aceptado), pero nunca se produciría una disminución de los mismos.

5.5.1.3 Conductores individuales y abonados con planteamiento determinista frente a conductores individuales y abonados con planteamiento estocástico. Función objetivo

	Abonados Deterministas	Abonados estocásticos		
		(0.8, 0.6, 0.4)	(0.6, 0.4, 0.2)	(0.7, 0.5, 0.3)
Problema	F.O. (€)	F.O. (€)	F.O. (€)	F.O. (€)
1	59694	59508	59239	59383
2	60373	60180	60050	60150
3	60277	60038	59902	59923
4	60435	60100	60012	60081
5	60604	60402	60301	60320
6	60493	60248	60150	60200
7	60594	60354	60312	60320
8	60656	60429	60343	60376

Tabla 5.20 Individuales y abonados deterministas frente a individuales y abonados estocásticos (F.O.)



Gráfica 5.5 Individuales y abonados deterministas frente a individuales y abonados estocásticos (F.O.)

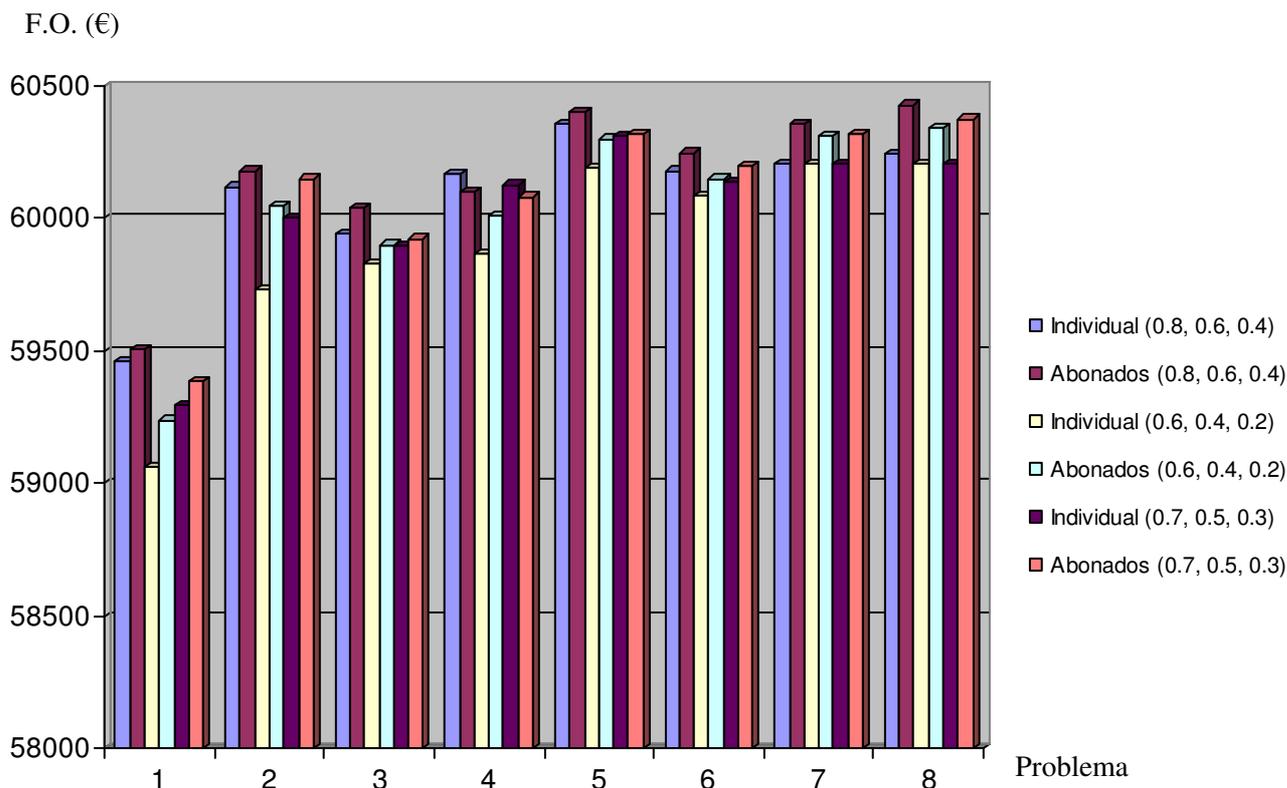
Al igual que en el apartado 5.5.1.1, el valor de la función objetivo para conductores individuales y abonados con demanda estocástica es menor que para conductores individuales y abonados con demanda determinista. La razón es la misma que la expuesta en dicho apartado. Destacar que en esta comparativa se obtienen mejores resultados que en el apartado mencionado porque aquí tenemos la incorporación de abonados. Esto, como vimos en el apartado anterior, en el peor de los casos, y si no se aceptara ningún grupo, mantendría los mismos ingresos; y en el caso en el que se aceptara algún grupo aumentaría los mencionados ingresos.

5.5.1.4 Conductores individuales con planteamiento estocástico frente a conductores individuales y abonados con planteamiento estocástico.

Función objetivo

Problema	(0.8, 0.6, 0.4)		(0.6, 0.4, 0.2)		(0.7, 0.5, 0.3)	
	Individual	Abonados	Individual	Abonados	Individual	Abonados
F.O. (€)	F.O. (€)	F.O. (€)	F.O. (€)	F.O. (€)	F.O. (€)	F.O. (€)
1	59462	59508	59063	59239	59295	59383
2	60120	60180	59733	60050	60005	60150
3	59945	60038	59831	59902	59897	59923
4	60169	60100	59867	60012	60127	60081
5	60359	60402	60189	60301	60310	60320
6	60179	60248	60088	60150	60137	60200
7	60207	60354	60207	60312	60207	60320
8	60244	60429	60208	60343	60208	60376

Tabla 5.21 Individuales estocásticos frente a individuales y abonados estocásticos (F.O.)



Gráfica 5.6 Individuales estocásticos frente a individuales y abonados estocásticos (F.O.)

En esta gráfica podemos ver que para los tres ejemplos de problemas estocásticos (0'8, 0'6, 0'4; 0'6, 0'4 , 0'2; y 0'7, 0'5, 0'3), la función objetivo es mayor en el caso en el que tengamos abonados que en el caso en el que no los tengamos. Los motivos son los mismos que los argumentados en el *apartado 5.5.1.2*.

5.5.2 Comparación de los tiempos de ejecución

En este apartado se exponen, para cada una de las comparativas, los resultados de los tiempos de ejecución tras la resolución de cada programa, junto con una serie de representaciones gráficas para facilitar la comprensión. En el eje de abscisas de las gráficas, se representan los problemas estudiados. En el eje de ordenadas, los tiempos de ejecución (expresados en segundos).

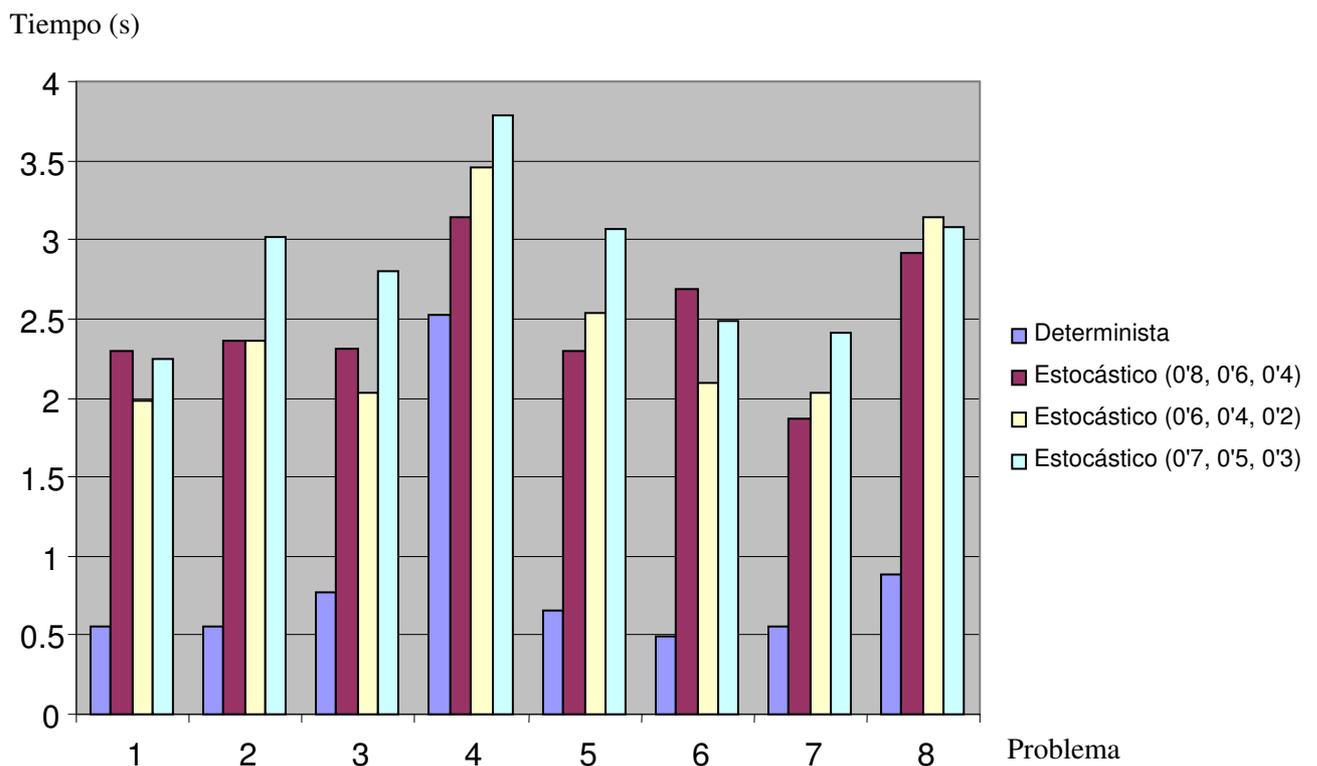
En todos los casos, los tiempos representados se corresponden a los necesarios para resolver el problema, es decir, a partir de la ejecución de la función `cplex.solve()`, sin tener en cuenta el tiempo de construcción del modelo ni el tiempo de extracción.

También hay que comentar que los problemas con presencia de abonados han sido resueltos con el algoritmo *MILP*, mientras que los que no presentan abonados con los algoritmos *Simplex Primal* y *Simplex Dual*.

5.5.2.1 Conductores individuales con planteamiento determinista frente a conductores individuales con planteamiento estocástico. Tiempos

	Determinista	(0.8, 0.6, 0.4)	(0.6, 0.4, 0.2)	(0.7, 0.5, 0.3)
Problema	Tiempo (s)	Tiempo (s)	Tiempo (s)	Tiempo (s)
1	0,55	2,3	1,98	2,25
2	0,55	2,36	2,36	3,02
3	0,77	2,31	2,03	2,8
4	2,52	3,14	3,46	3,79
5	0,66	2,3	2,53	3,07
6	0,49	2,69	2,09	2,48
7	0,55	1,87	2,03	2,41
8	0,88	2,91	3,14	3,08

Tabla 5.22 Individuales deterministas frente a individuales estocásticos (Tiempos)



Gráfica 5.7 Individuales deterministas frente a individuales estocásticos (Tiempos)

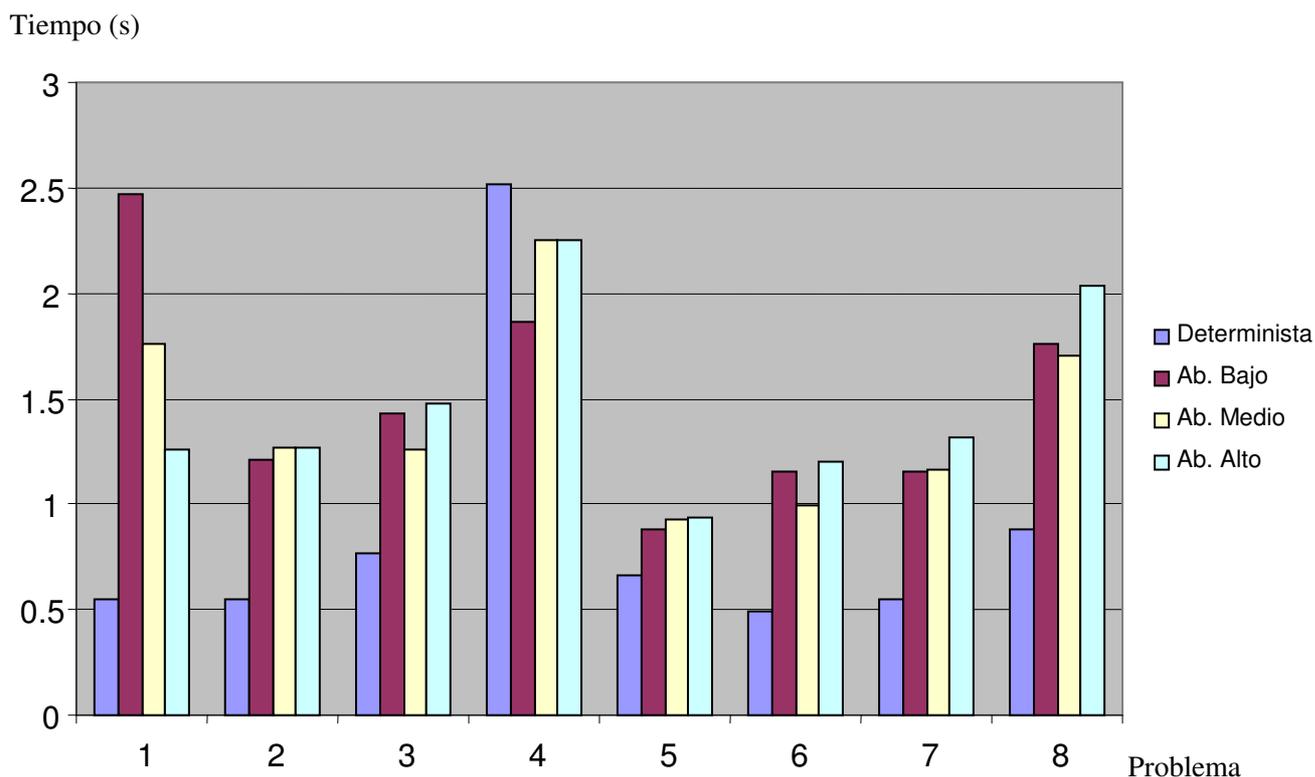
Se puede apreciar con claridad como el programa es más rápido al resolver problemas deterministas que problemas estocásticos. Esto es debido a que los problemas deterministas presentan un número menor de variables que los problemas estocásticos. Por tanto, a mayor número de variables, mayor es el tiempo de resolución.

5.5.2.2 Conductores individuales con planteamiento determinista frente a conductores individuales y abonados con planteamiento determinista.

Tiempos

	Determinista	Ab. Bajo	Ab. Medio	Ab. Alto
Problema	Tiempo (s)	Tiempo (s)	Tiempo (s)	Tiempo (s)
1	0,55	2,47	1,76	1,26
2	0,55	1,21	1,27	1,27
3	0,77	1,43	1,26	1,48
4	2,52	1,86	2,25	2,25
5	0,66	0,88	0,93	0,94
6	0,49	1,15	0,99	1,20
7	0,55	1,15	1,16	1,32
8	0,88	1,76	1,70	2,03

Tabla 5.23 Individuales deterministas frente a individuales y abonados deterministas (Tiempos)



Gráfica 5.8 Individuales deterministas frente a individuales y abonados deterministas (Tiempos)

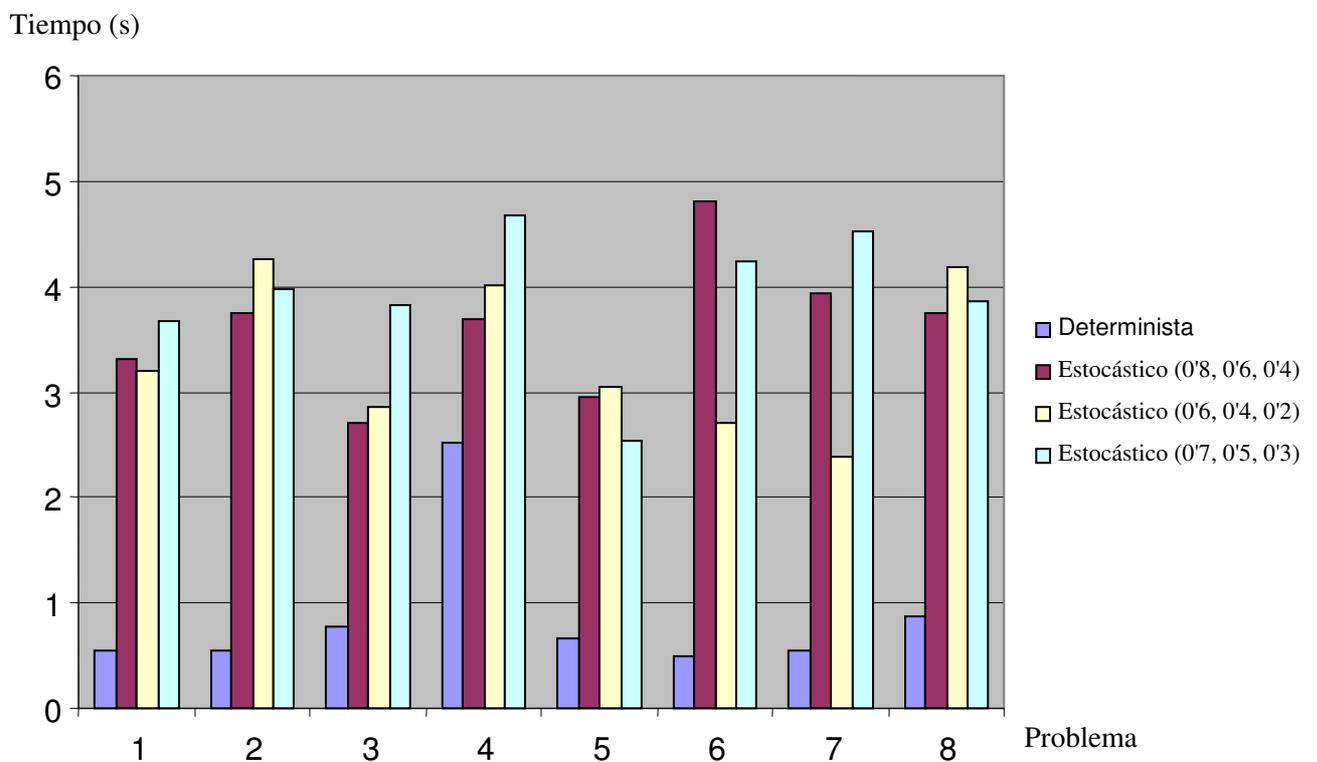
Para la comparativa realizada en este apartado, aunque no se puede tomar como norma general porque hay problemas, concretamente el 4, que no lo cumple, podemos decir que los tiempos de

resolución de problemas de conductores individuales son menores que los tiempos de resolución de problemas con presencia de abonados.

5.5.2.3 Conductores individuales y abonados con planteamiento determinista frente a conductores individuales y abonados con planteamiento estocástico. Tiempos

Problema	Abonados Deterministas	Abonados estocásticos		
	Tiempo (s)	(0.8, 0.6, 0.4)	(0.6, 0.4, 0.2)	(0.7, 0.5, 0.3)
1	0,55	3,32	3,19	3,68
2	0,55	3,75	4,26	3,97
3	0,77	2,7	2,86	3,83
4	2,52	3,69	4,01	4,68
5	0,66	2,96	3,04	2,54
6	0,49	4,81	2,71	4,24
7	0,55	3,93	2,39	4,53
8	0,88	3,74	4,18	3,87

Tabla 5.24 Individuales y abonados deterministas frente a individuales y abonados estocásticos (Tiempos)



Gráfica 5.9 Individuales y abonados deterministas frente a individuales y abonados estocásticos (Tiempos)

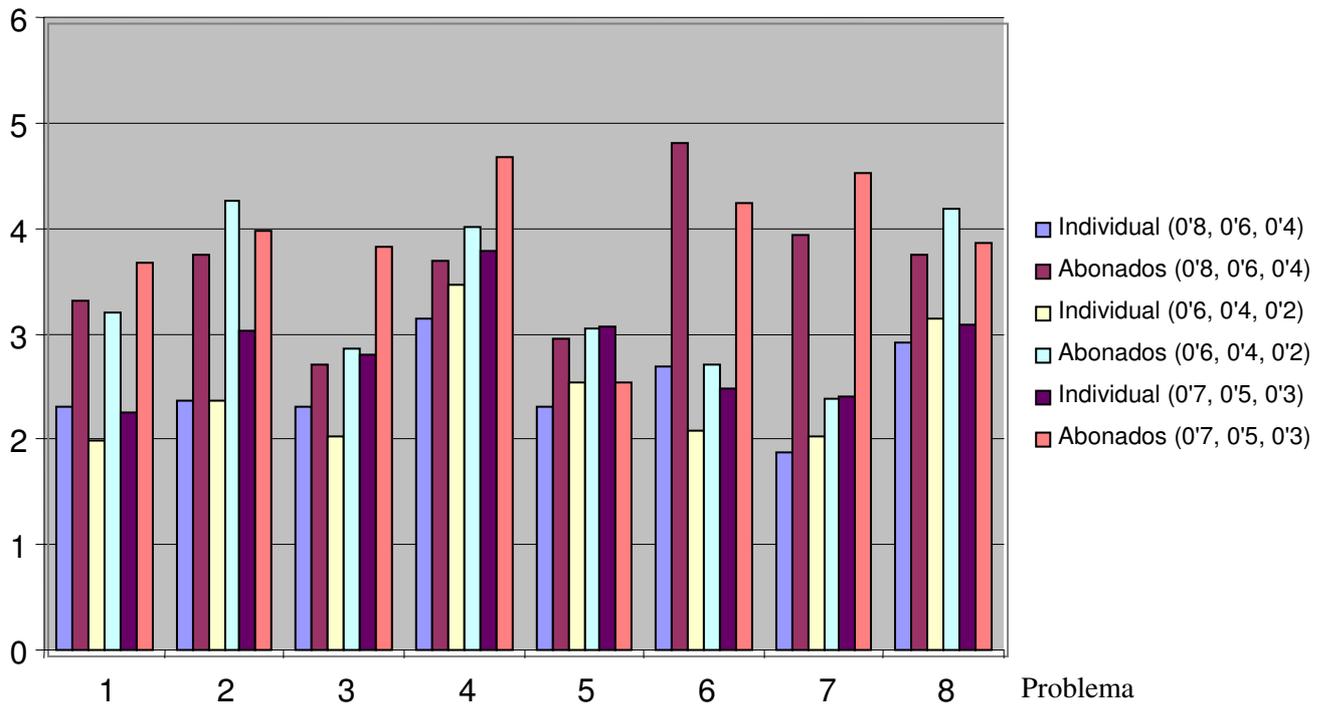
Al igual que ocurría en el apartado 5.5.2.1, la resolución de problemas deterministas es más rápida de la de problemas estocásticos. Podemos llegar a la siguiente conclusión: independientemente de la existencia de abonados o no, los problemas deterministas se resuelven con mayor rapidez que los estocásticos.

5.5.2.4 Conductores individuales con planteamiento estocástico frente a conductores individuales y abonados con planteamiento estocástico. Tiempos

	(0.8, 0.6, 0.4)		(0.6, 0.4, 0.2)		(0.7, 0.5, 0.3)	
	Individual	Abonados	Individual	Abonados	Individual	Abonados
Problema	Tiempo (s)	Tiempo (s)	Tiempo (s)	Tiempo (s)	Tiempo (s)	Tiempo (s)
1	2,3	3,32	1,98	3,19	2,25	3,68
2	2,36	3,75	2,36	4,26	3,02	3,97
3	2,31	2,7	2,03	2,86	2,8	3,83
4	3,14	3,69	3,46	4,01	3,79	4,68
5	2,3	2,96	2,53	3,04	3,07	2,54
6	2,69	4,81	2,09	2,71	2,48	4,24
7	1,87	3,93	2,03	2,39	2,41	4,53
8	2,91	3,74	3,14	4,18	3,08	3,87

Tabla 5.25 Individuales estocásticos frente a individuales y abonados estocásticos (Tiempos)

Tiempo (s)



Gráfica 5.10 Individuales estocásticos frente a individuales y abonados estocásticos (Tiempos)

En esta gráfica podemos observar que para cada pareja de problemas individual-abonados, independientemente del problema, el tiempo de ejecución para problemas individuales es menor que para problemas con la presencia de abonados. Así, como conclusión, podemos decir que los problemas individuales son más rápidos que los problemas con abonados siempre que estemos en un planteamiento estocástico.

5.5.3 Comparación del número de iteraciones

En este apartado se exponen, para cada una de las comparativas, el número de iteraciones obtenidas tras la resolución de cada programa, junto con una serie de representaciones gráficas para facilitar la comprensión. En el eje de abscisas de las gráficas se representan los problemas estudiados. En el eje de ordenadas el número de iteraciones.

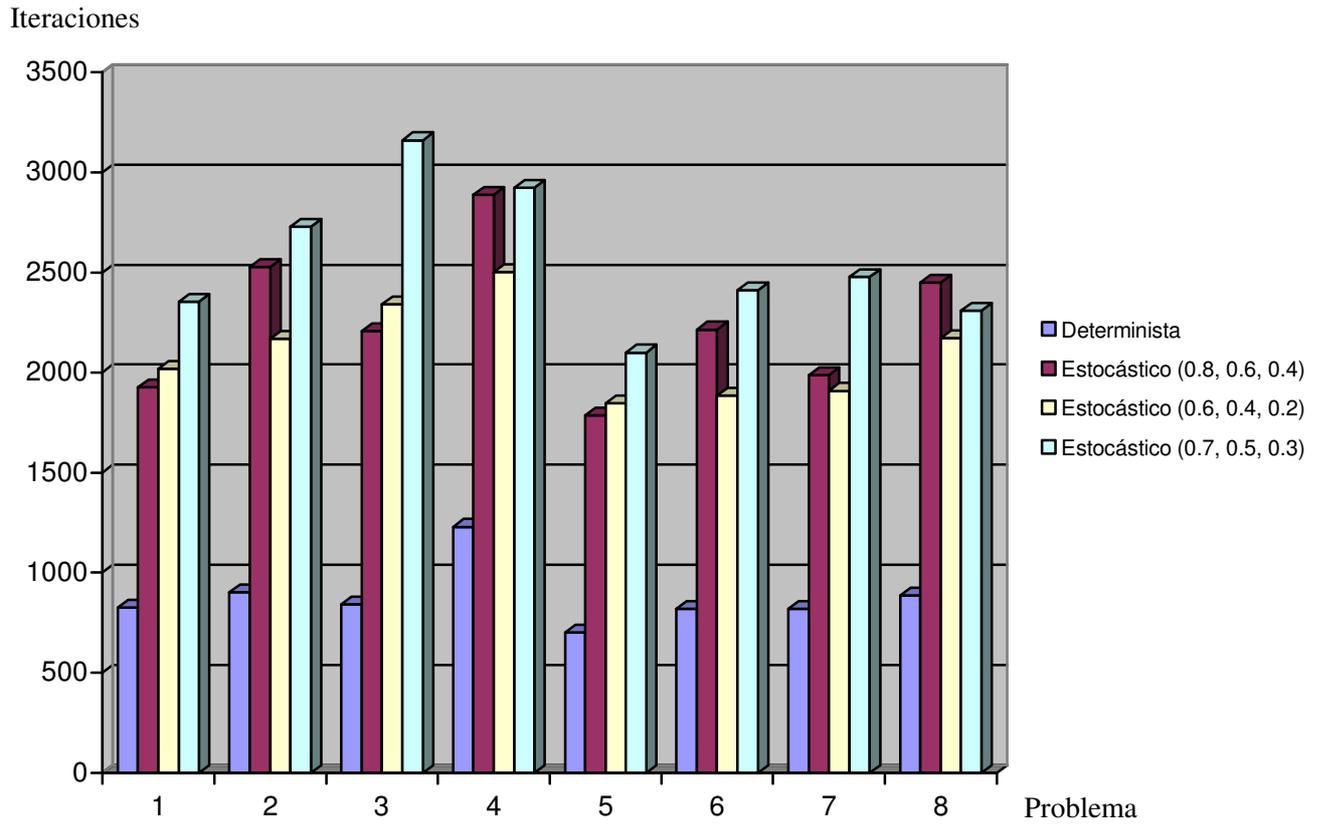
En todos los casos, el número de iteraciones es mayor que cero. Esto quiere decir que, en los problemas, no hay suficientes plazas de aparcamiento como para poder abastecer a todas las demandas. En el EJ2 (problema perteneciente a la batería de pequeños problemas del *apartado 5.1*), no ocurre así. En este problema, en todo momento, hay siempre plazas de aparcamiento disponibles. De ahí que, en este caso, el número de iteraciones sea cero.

Es necesario aclarar, en este apartado, que el número de iteraciones no tiene necesariamente una relación directa con el tiempo de resolución del problema, ya que depende de la metodología de cada algoritmo de resolución empleado.

5.5.3.1 Conductores individuales con planteamiento determinista frente a conductores individuales con planteamiento estocástico. Número de iteraciones

	Determinista	(0.8, 0.6, 0.4)	(0.6, 0.4, 0.2)	(0.7, 0.5, 0.3)
Problema	Iteraciones	Iteraciones	Iteraciones	Iteraciones
1	826	1926	2019	2353
2	901	2529	2167	2728
3	841	2206	2339	3161
4	1229	2888	2503	2924
5	701	1786	1846	2099
6	819	2214	1885	2410
7	819	1985	1908	2477
8	886	2448	2172	2307

Tabla 5.26 Individuales deterministas frente a individuales estocásticos (Iteraciones)



Gráfica 5.11 Individuales deterministas frente a individuales estocásticos (Iteraciones)

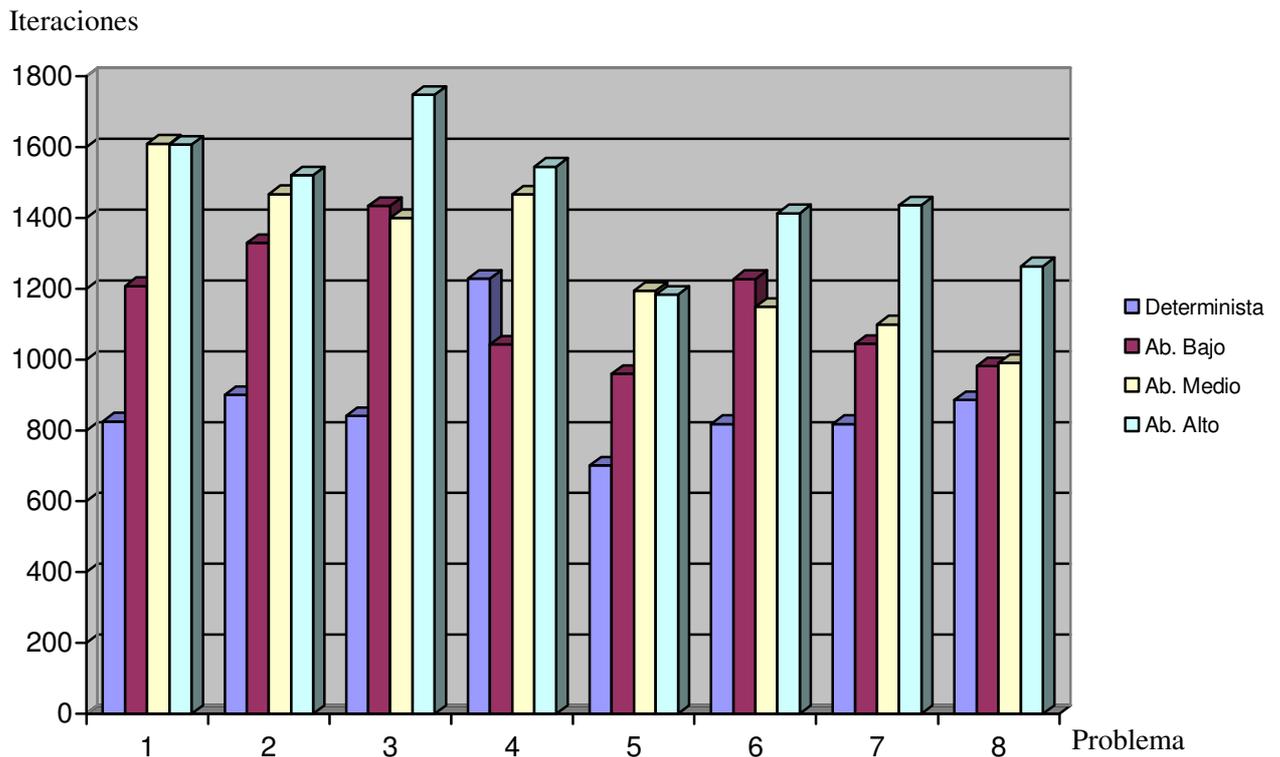
En esta gráfica se puede observar como la resolución de los problemas deterministas conlleva un menor número de iteraciones que la resolución de los problemas estocásticos. Esto se debe a que el número de variables de los problemas deterministas es menor que el de los problemas estocásticos.

5.5.3.2 Conductores individuales con planteamiento determinista frente a conductores individuales y abonados con planteamiento determinista.

Número de iteraciones

	Determinista	Ab. Bajo	Ab. Medio	Ab. Alto
Problema	Iteraciones	Iteraciones	Iteraciones	Iteraciones
1	826	1208	1610	1607
2	901	1330	1468	1521
3	841	1435	1400	1748
4	1229	1043	1467	1545
5	701	960	1195	1184
6	819	1228	1150	1414
7	819	1045	1100	1436
8	886	982	991	1264

Tabla 5.27 Individuales deterministas frente a individuales y abonados deterministas (Iteraciones)



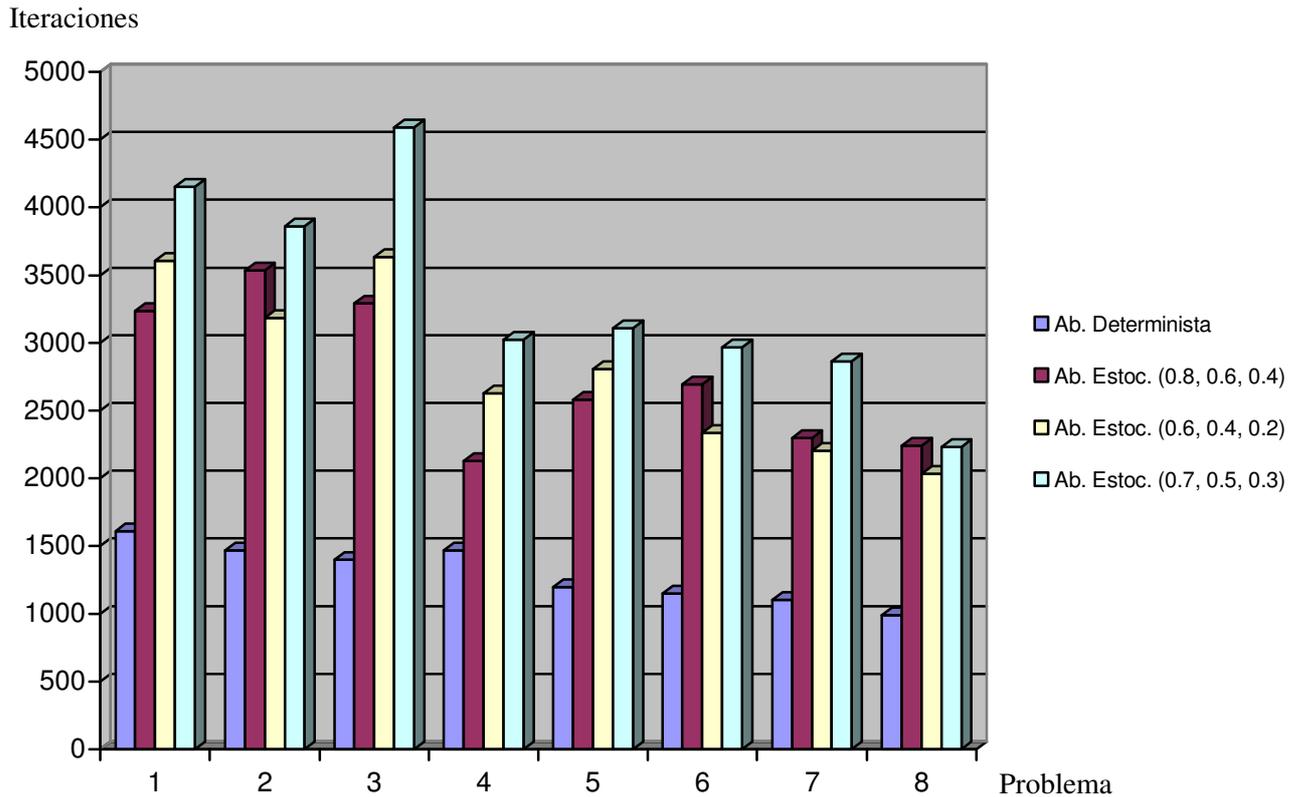
Gráfica 5.12 Individuales deterministas frente a individuales y abonados deterministas (Iteraciones)

Para la comparativa realizada en este apartado, podemos concluir que el número de iteraciones en problemas de conductores individuales es menor que en problemas con presencia de abonados. De todas formas, no se puede tomar esta conclusión como norma general debido a que en el problema 4 no ocurre así.

5.5.3.3 Conductores individuales y abonados con planteamiento determinista frente a conductores individuales y abonados con planteamiento estocástico. Número de Iteraciones

Problema	Abonados	Abonados estocásticos		
	Deterministas	(0.8, 0.6, 0.4)	(0.6, 0.4, 0.2)	(0.7, 0.5, 0.3)
	Iteraciones	Iteraciones	Iteraciones	Iteraciones
1	1610	3236	3606	4153
2	1468	3537	3185	3860
3	1400	3290	3635	4592
4	1467	2127	2625	3022
5	1195	2581	2808	3107
6	1150	2691	2335	2967
7	1100	2296	2203	2864
8	991	2240	2032	2230

Tabla 5.28 Individuales y abonados deterministas frente a individuales y abonados estocásticos (Iteraciones)



Gráfica 5.13 Individuales y abonados deterministas frente a individuales y abonados estocásticos (Iteraciones)

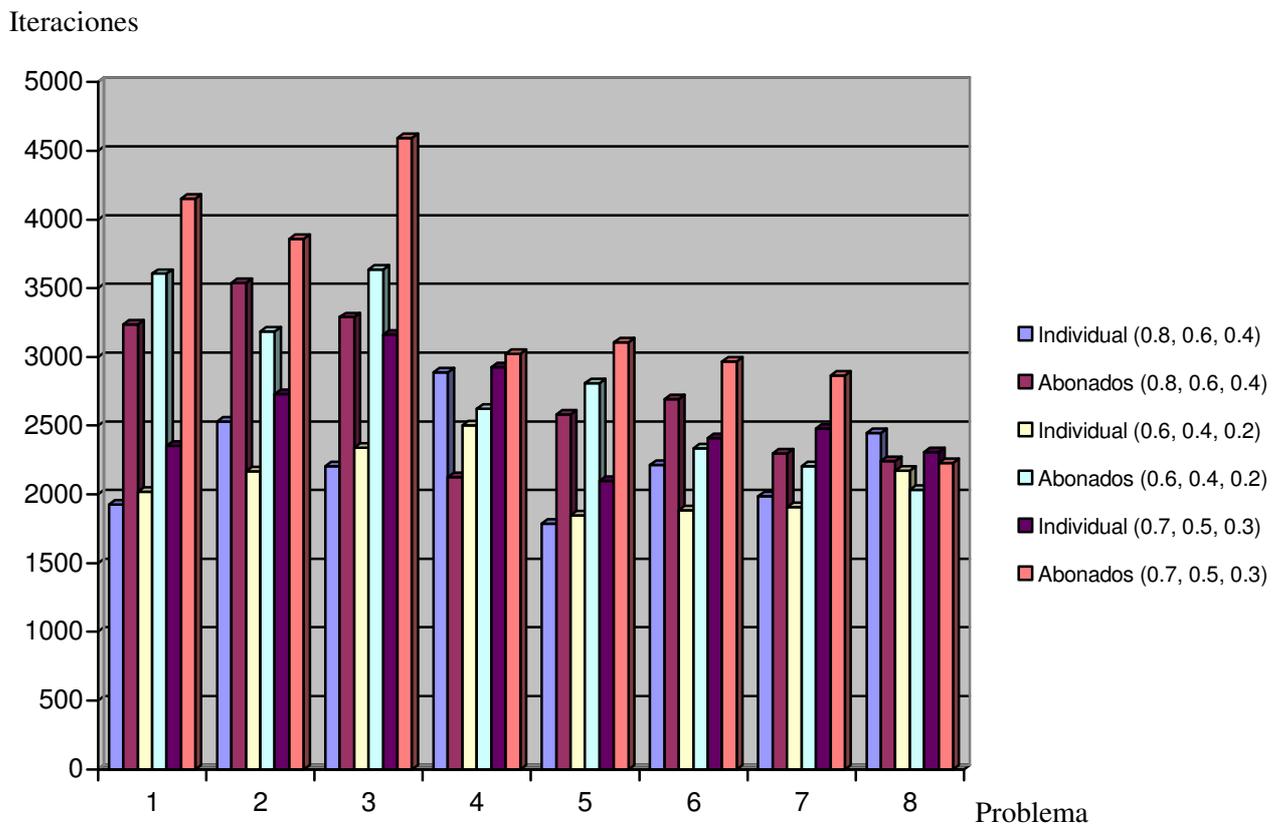
Al igual que en el apartado 5.5.3.1, el número de iteraciones en los problemas deterministas es menor que en los problemas estocásticos. Podemos, por tanto, llegar a la conclusión de que independientemente de la existencia de abonados o no, los problemas deterministas se resuelven en un número menor de iteraciones que los estocásticos. Esto se debe a que el número de variables es menor.

5.5.3.4 Conductores individuales con planteamiento estocástico frente a conductores individuales y abonados con planteamiento estocástico.

Número de iteraciones

Problema	(0.8, 0.6, 0.4)		(0.6, 0.4, 0.2)		(0.7, 0.5, 0.3)	
	Individual	Abonados	Individual	Abonados	Individual	Abonados
1	1926	3236	2019	3606	2353	4153
2	2529	3537	2167	3185	2728	3860
3	2206	3290	2339	3635	3161	4592
4	2888	2127	2503	2625	2924	3022
5	1786	2581	1846	2808	2099	3107
6	2214	2691	1885	2335	2410	2967
7	1985	2296	1908	2203	2477	2864
8	2448	2240	2172	2032	2307	2230

Tabla 5.29 Individuales estocásticos frente a individuales y abonados estocásticos (Iteraciones)



Gráfica 5.14 Individuales estocásticos frente a individuales y abonados estocásticos (Iteraciones)

En esta gráfica podemos observar que para los tres ejemplos de problemas estocásticos (0'8,0'6,0'4; 0'6,0'4,0'2, y 0'7, 0'5, 0'3), por lo general, para cada pareja de problemas individual-abonados, el número de iteraciones es mayor en el problema en el que hay abonados. En el problema 4, como ocurría en otros apartados anteriores, para la pareja que se corresponde con las probabilidades (0.8, 0.6, 0.4) no ocurre así.

5.6 Precio mínimo. Datos, resultados e interpretación

En este último apartado se pretende determinar el precio mínimo del abono, a partir del cual, un grupo de abonados es aceptado. Como se comentó en el *capítulo 3*, para estimar este precio, en primer lugar, se calcula la distribución óptima de los conductores individuales de las tres categorías individuales (normal, residente y comerciante) en cada hora y para las distintas estancias de las mismas, sin tener en cuenta al grupo de abonados, que proporciona el mayor beneficio. En segundo lugar, a esta distribución se le incorpora el número de conductores individuales que serían desplazados si se acepta al grupo de abonados (ya que la capacidad del aparcamiento es limitada). Los posibles conductores individuales rechazados debido a la admisión del grupo, proporcionarían unos ingresos que se perderían por aceptar al grupo. Por último, se dividen estos ingresos entre el número de miembros que forman el grupo (tamaño del grupo de abonados) y se obtiene el precio mínimo para cada componente del grupo de abonados. Este precio es el precio mínimo del abono, que tendría que pagar cada miembro del grupo de abonados para poder conseguir la plaza de aparcamiento.

5.6.1 Precio mínimo. Datos

Para trabajar en este apartado hemos utilizado los problemas EJ3 y EJ4. Los datos de estos dos problemas fueron explicados en el *apartado 5.1*. A modo de resumen, se vuelven a mostrar en las siguientes tablas (*tabla 5.30*, *tabla 5.31* y *tabla 5.32*):

Categorías Conductores Individuales	Franja Horaria	Precio (€)
Normal	Cara	1.50
	Barata	1.20
Residente	Cara	1.20
	Barata	0.96
Comerciante	Cara	0.96
	Barata	0.60

Tabla 5.30 Precios de las distintas categorías

Franja Horaria	Horario
Cara	8:00 – 14:00 y 16:00 – 19:00 Horas
Barata	00:00 – 8:00, 14:00 – 16:00 y 19:00 – 24:00 Horas

Tabla 5.31 Franjas horarias

Capacidad		80 Plazas			
Problema	Nº Días	Categorías Individuales	Normal	Residente	Comerciante
EJ3	5	Estancias (Horas)	3	5	7
		Límites Diurnos	0 / 20	0 / 15	0 / 8
		Límites Nocturnos	0 / 2	0 / 3	0 / 2
EJ4	5	Estancias (Horas)	3	5	7
		Límites Diurnos	0 / 8	0 / 5	0 / 4
		Límites Nocturnos	0 / 1	0 / 1	0 / 1

Tabla 5.32 Datos de los problemas

Estos dos problemas nos proporcionaron unas determinadas demandas y capacidades horarias. Sobre esta base, hemos trabajado con una batería de problemas (*tabla 5.33*) con la que se generarán los grupos de abonados:

Problema	Abono		Día Llegada	Tamaño
	1 Día	5 Días		
1	SI	NO	1	1
2	SI	NO		10
3	SI	NO		20
4	SI	NO		30
5	SI	NO		40
6	SI	NO	2	1
7	SI	NO		10
8	SI	NO		20
9	SI	NO		30
10	SI	NO		40
11	SI	NO	3	1
12	SI	NO		10
13	SI	NO		20
14	SI	NO		30
15	SI	NO		40
16	SI	NO	4	1
17	SI	NO		10
18	SI	NO		20
19	SI	NO		30
20	SI	NO		40
21	SI	NO	5	1
22	SI	NO		10
23	SI	NO		20
24	SI	NO		30
25	SI	NO		40
26	NO	SI	1	1
27	NO	SI		10
28	NO	SI		20
29	NO	SI		30
30	NO	SI		40

Tabla 5.33 Batería de problemas. Datos

Podemos observar en la tabla anterior como los problemas se diferencian entre sí en el tipo del grupo de abonados (de un día o de cinco días), y en el día de llegada y tamaño del grupo. Hemos trabajado con abonos de un día y de cinco días, ya que el número de días en los que se pretende optimizar es cinco (horizonte temporal de 120 horas).

Los datos de estos problemas fueron introducidos en el programa segundo (explicado en el apartado 5.3). Este programa generó los grupos, y nos proporcionó los ficheros de salida que fueron la entrada del programa séptimo (programa que calcula el precio mínimo).

5.6.2 Precio mínimo. Resultados

El programa séptimo nos muestra el precio mínimo necesario que debe tener cada componente de un grupo de abonados para que este grupo sea aceptado. El fichero de entrada a este programa nos lo proporciona el segundo programa y presenta los siguientes datos:

Programa séptimo: Obtención del precio mínimo para un grupo de abonados.

- Número de días.
- Número de categorías individuales.
- Estancias máximas para las categorías individuales.
- Precio para la primera categoría en franja horaria barata y cara.
- Precio para la segunda categoría en franja horaria barata y cara.
- Precio para la tercera categoría en franja horaria barata y cara.
- Franjas horarias con precio caro.
- Demandas generadas para el planteamiento determinista.
- Capacidades horarias generadas.
- Estancias del grupo de abonados.
- Día de llegada del grupo de abonados.
- Hora de llegada del grupo de abonados.
- Tamaño del grupo de abonados.

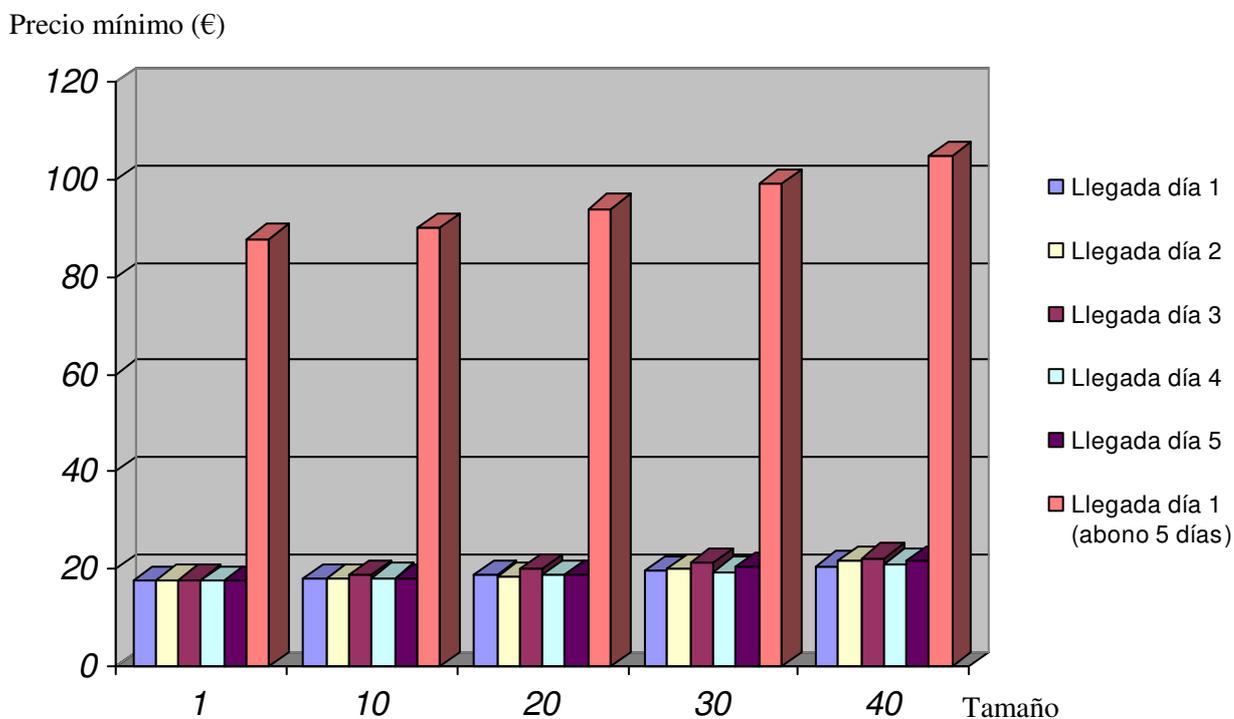
Los resultados obtenidos se muestran a continuación (*tabla 5.34*):

Problema	Precio mínimo (€)	
	EJ3	EJ4
1	17.46	10.02
2	18.01	10.78
3	18.77	11.41
4	19.58	12.03
5	20.59	12.59
6	17.82	9.36
7	17.97	10.15
8	18.49	11.23
9	19.95	12.32
10	21.55	13.14
11	17.82	12.60
12	18.66	12.79
13	20.02	13.37
14	21.30	13.82
15	22.33	14.56
16	17.52	10.50
17	18.11	10.88
18	18.70	11.37
19	19.44	11.98
20	21.01	12.80
21	17.58	11.40
22	17.85	11.63
23	18.89	11.97
24	20.42	12.15
25	21.74	13.18
26	87.90	53.88
27	90.19	56.25
28	94.00	59.36
29	99.02	62.73
30	104.93	66.29

Tabla 5.34 Precio mínimo de los distintos problemas

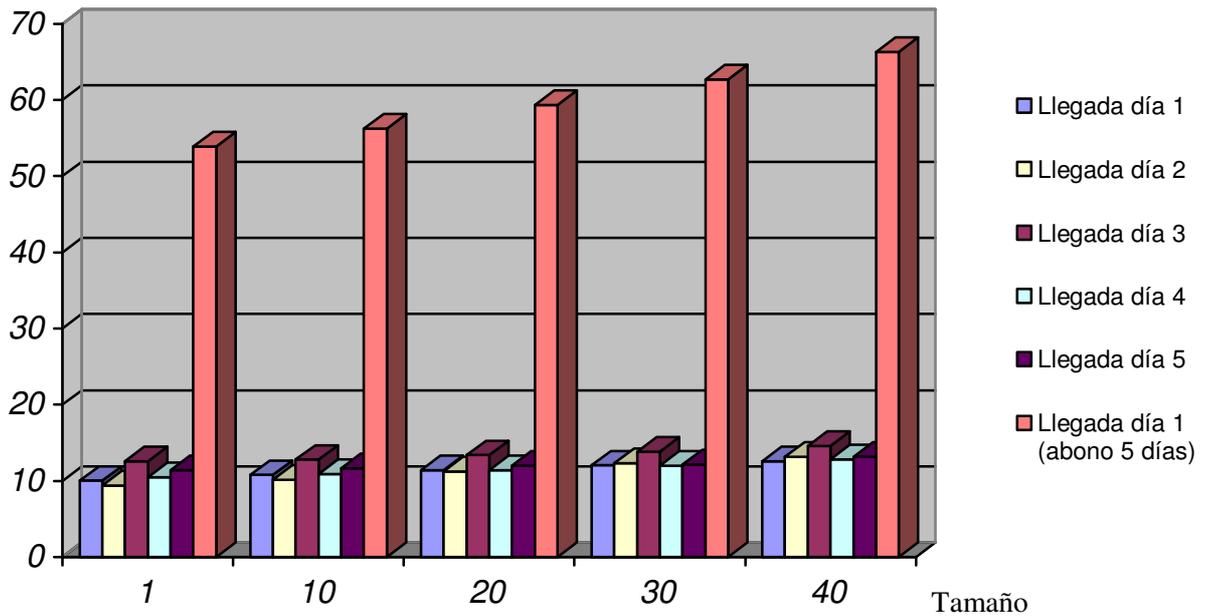
5.6.3 Precio mínimo. Interpretación

En este apartado vamos a trabajar con distintas gráficas que nos ayuden a poder sacar conclusiones con los resultados obtenidos en el apartado anterior. Las dos gráficas siguientes (*gráfica 5.15* y *gráfica 5.16*) muestran los resultados presentados en la anterior tabla (*tabla 5.34*) para que puedan ser interpretados más fácilmente. En la primera de las gráficas se observan los valores obtenidos para EJ3. En la segunda, los valores obtenidos para EJ4. Las gráficas representan, en el eje de abscisas, el tamaño del grupo de abonados (número de componentes que forman el grupo) y, en el eje de ordenadas, el valor del precio mínimo obtenido (en euros). Las columnas coinciden con los valores de la *tabla 5.34*.



Gráfica 5.15 Precio mínimo frente a tamaño en EJ3

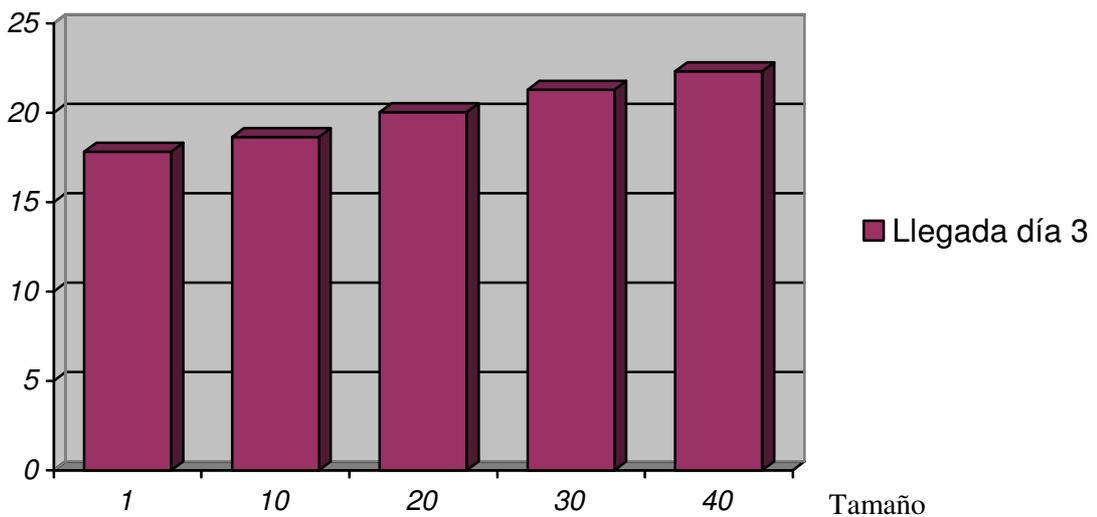
Precio mínimo (€)



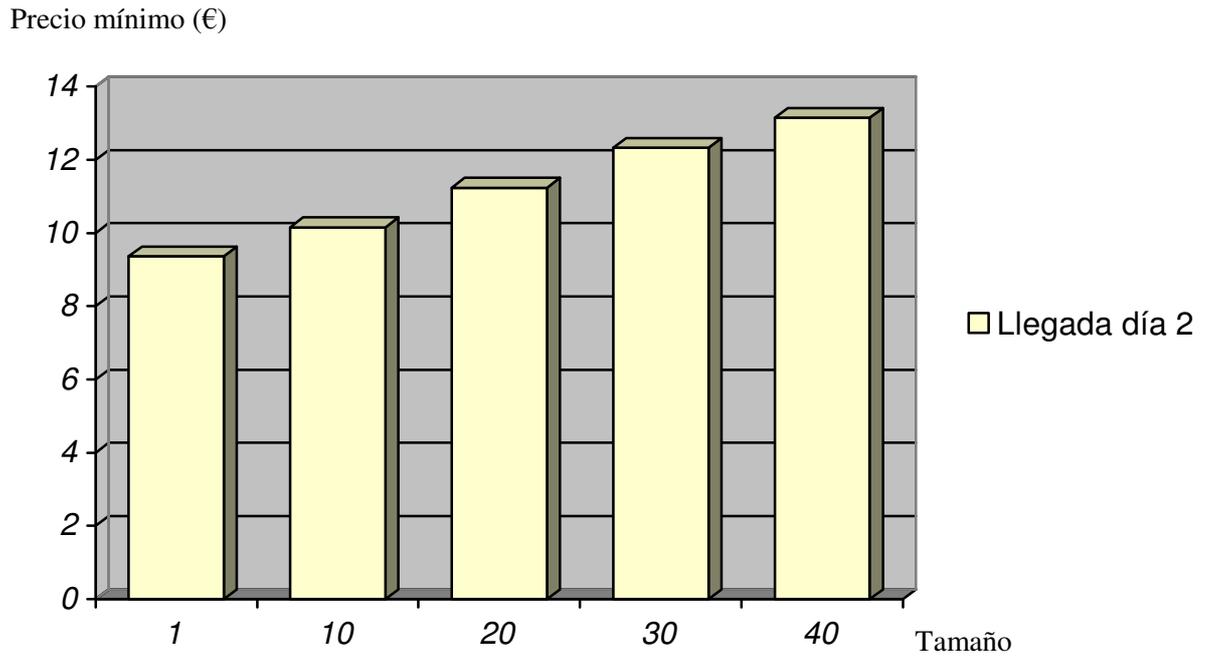
Gráfica 5.16 Precio mínimo frente a tamaño en EJ4

Podemos observar en ambas gráficas como, en todos los problemas, al aumentar el tamaño del grupo de abonados, aumenta el precio mínimo del abono, tanto en los abonos diarios como en los de cinco días. Esto es debido a que un mayor número de conductores individuales son desplazados y, por tanto, el dinero que se deja de ingresar es mayor. En las dos siguientes gráficas (*gráfica 5.17* y *gráfica 5.18*) se puede observar este efecto:

Precio mínimo (€)



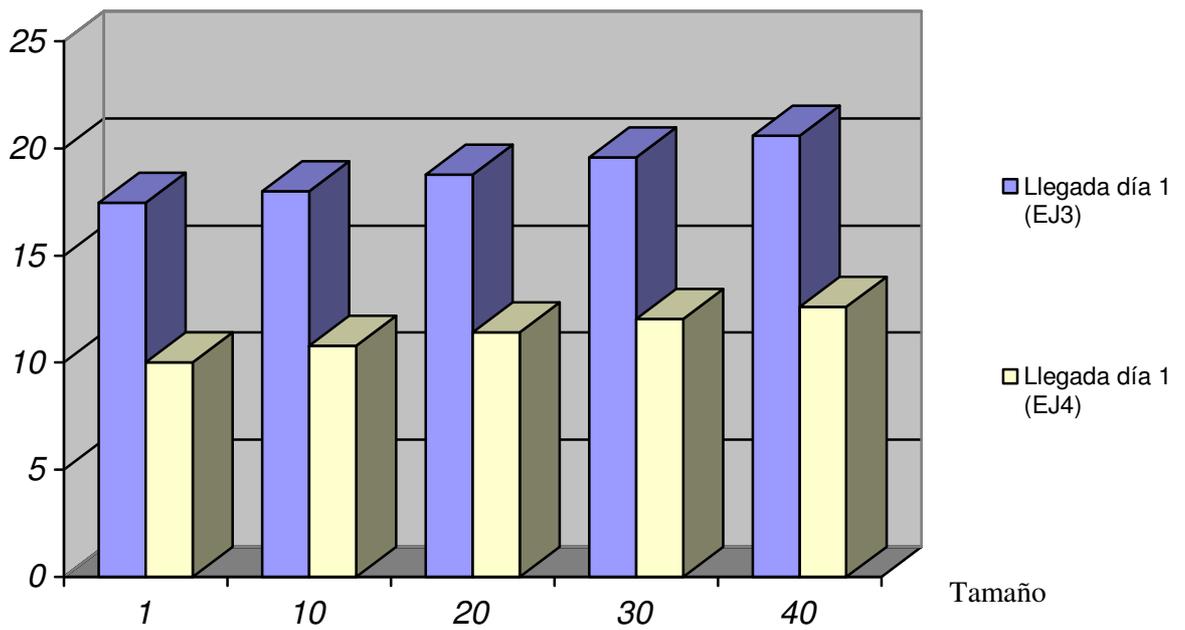
Gráfica 5.17 Precio mínimo frente a tamaño del grupo de abonados diarios con llegada el día 3 (EJ3)



Gráfica 5.18 Precio mínimo frente a tamaño del grupo de abonados diarios con llegada el día 2 (EJ4)

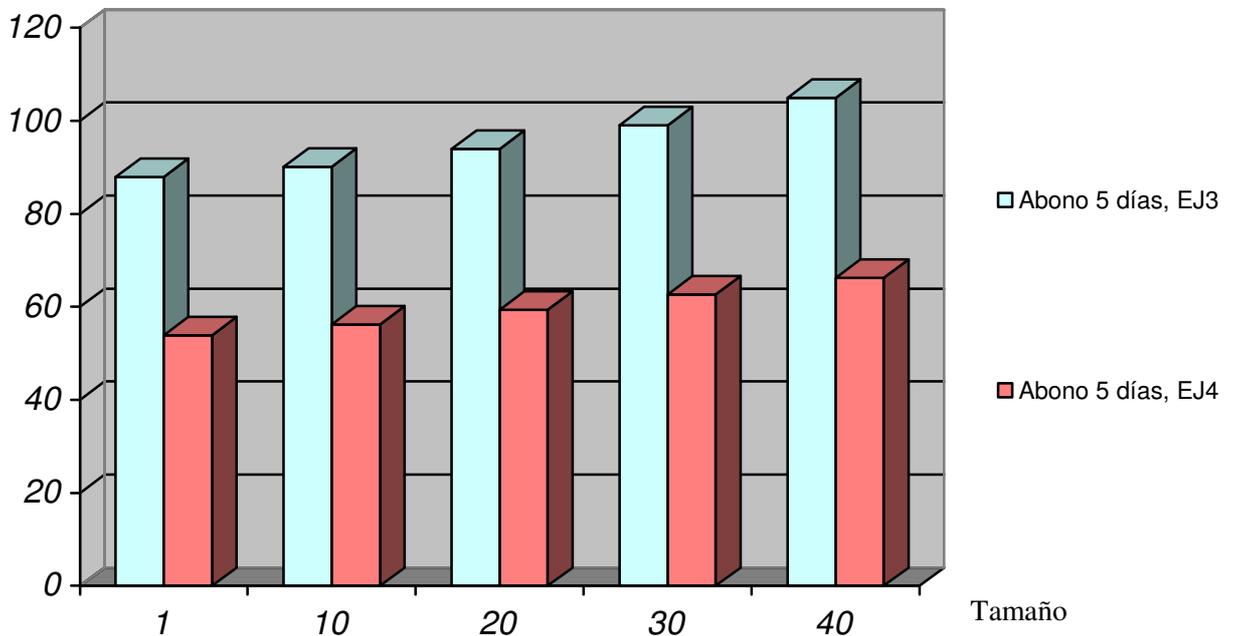
Por último, decir que los precios mínimos obtenidos para los abonos en EJ3 son mayores que los obtenidos en EJ4. Esto es debido a que el número de demandas horarias en el problema EJ3 es mayor que el número de demandas horarias en el problema EJ4, para cada una de las categorías individuales. Este hecho se puede observar en la *tabla 5.32 (apartado 5.6.1)*. Los límites para la generación de demandas, tanto diurnos como nocturnos, son superiores en EJ3. En las siguientes gráficas (*gráfica 5.19* y *gráfica 5.20*) se comparan estos valores, tanto para abonados diarios como para abonados de cinco días. También se puede observar, de nuevo, como al aumentar el tamaño del grupo de abonados el precio mínimo del abono siempre aumenta.

Precio mínimo (€)



Gráfica 5.19 Precio mínimo frente a tamaño del grupo de abonados diarios con llegada el día 1 en EJ3 y EJ4

Precio mínimo (€)



Gráfica 5.20 Precio mínimo frente a tamaño del grupo de abonados de cinco días con llegada el día 1 en EJ3 y EJ4