

6 Conclusiones y líneas futuras

En este proyecto se ha realizado una descripción de la herramienta ILOG CPLEX, la cual dispone de varias tecnologías para resolver problemas mediante el uso de varios algoritmos. En este proyecto, se ha usado la tecnología *Concert Technology* para la implementación en lenguaje Visual C++ de diversos tipos de problemas de gestión de recursos (*YM*), utilizando diferentes planteamientos de resolución. En concreto, se han resuelto cuatro modelos para abordar el planteamiento y resolución de la optimización de recursos aplicados al caso particular de un aparcamiento de automóviles. Los dos primeros modelos se basan en problemas de programación lineal con variables continuas y fueron resueltos con los algoritmos *Simplex Primal* y *Simplex Dual*. Los otros dos consistieron en problemas de programación lineal mixta que mezclan variables continuas con discretas (en nuestro caso binarias). Estos modelos fueron resueltos utilizando el algoritmo *MIP*, especialmente diseñado para resolver problemas *MILP*.

Los cuatro problemas modelados son los siguientes:

- a) Modelo determinista para conductores individuales.
- b) Modelo estocástico para conductores individuales.
- c) Modelo determinista para conductores individuales y abonados.
- d) Modelo estocástico para conductores individuales y abonados.

Se han realizado cuatro comparaciones, utilizando estos cuatro modelos, desde el punto de vista de la función objetivo, los tiempos de ejecución y el número de iteraciones en la resolución de los distintos problemas. Estas cuatro comparaciones nos han servido para estudiar los valores de la función objetivo, los tiempos de ejecución y el número de iteraciones al pasar del planteamiento determinista al planteamiento estocástico, y al introducir abonados en problemas en los que sólo había conductores individuales.

Las cuatro comparaciones estudiadas han sido:

- a) Conductores individuales con planteamiento determinista frente a conductores individuales con planteamiento estocástico.
- b) Conductores individuales con planteamiento determinista frente a conductores individuales y abonados con planteamiento determinista.
- c) Conductores individuales con planteamiento determinista frente a conductores individuales y abonados con planteamiento estocástico.

- d) Conductores individuales con planteamiento estocástico frente a conductores individuales y abonados con planteamiento estocástico.

Haciendo uso del modelo determinista para conductores individuales, se obtuvo el método para la obtención del precio mínimo del abono a partir del cual un grupo de abonados sería aceptado.

Por último, se analizó pormenorizadamente el comportamiento de los precios mínimos ante la variación del tamaño de los grupos de abonados. El análisis presentaba gran interés con respecto al incremento de precio que registraba el aumentar el número de personas que integraban el grupo, corroborado tanto por los resultados de la aplicación diseñada a tal efecto como por el cálculo de los precios duales. Esto es así porque aquellos que llegan nuevos le están restando al aparcamiento los ingresos de aquellos que han de ser rechazados para admitir a los nuevos. Conforme mayor sea el número de personas del grupo, mejores conductores individuales deberán ser rechazados, de ahí que el precio mínimo se incremente. Por otro lado, existe también el razonamiento de que el precio debería disminuir al aumentar el número de componentes del grupo de abonados, por asegurar unos ingresos fijos. Aquí habrá que tener en cuenta el menor riesgo que implica un grupo de abonados, que suele ser un ingreso seguro y por adelantado, frente a los conductores individuales.

Para trabajar con los diferentes modelos se usaron datos ficticios, o bien se generaron de forma aleatoria ante la ausencia de datos reales. Sin embargo, los programas están implementados para resolver casos reales donde se conozcan los datos de demandas y capacidades de casos concretos.

Se ha realizado la resolución de dos baterías de problemas en diferentes escenarios y con distintas dimensiones. Posteriormente, se compararon los resultados obtenidos por los diferentes algoritmos de resolución. Es necesario destacar que las soluciones, obtenidas tras resolver los problemas por todos los algoritmos, eran enteras. No se dieron en ningún caso soluciones continuas, por lo que, si no se hubieran relajado las variables del problema de enteras a continuas para el caso de los conductores individuales, no habría habido ninguna pérdida de información. Para el análisis de los resultados se han utilizado diversas tablas y gráficos, con la ayuda de los cuales se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Con el objeto de contrastar los resultados y para cerciorarse de que las soluciones obtenidas por la herramienta ILOG CPLEX eran satisfactorias, se resolvieron una serie de problemas de pequeño tamaño usando la utilidad solver de la hoja de cálculo Excel. Los resultados obtenidos para la función objetivo, a través de esta técnica, coincidieron en todos los casos

con los proporcionados por ILOG CPLEX. Sin embargo, algunos de los valores de las variables correspondientes a las soluciones resultaron ser distintos en función de la técnica usada para la resolución del problema. Este resultado es coherente, ya que estos valores no tienen necesariamente que ser únicos.

- Todos los algoritmos consiguieron alcanzar la solución óptima de la totalidad de los problemas de las dos baterías en un tiempo razonable en comparación con sus dimensiones. Esto permitió que no fuera necesario realizar un estudio de la evolución de los valores intermedios de las soluciones a lo largo del tiempo de ejecución.
- Se han estudiado los valores de las funciones objetivo para las cuatro comparaciones. Se ha podido concluir que la presencia de abonados en nuestros problemas hace que se consigan mayores beneficios. 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. Por otro lado, al comparar el planteamiento determinista con el estocástico, independientemente de que tengamos abonados o no, se han obtenido mejores resultados para el planteamiento determinista que para el estocástico. Esta pérdida de ingresos es debida a la presencia de incertidumbre en el modelo estocástico respecto al determinista. Esta diferencia es definida por la programación estocástica como el valor esperado de la información perfecta. Sería la cantidad dispuesta a pagar para asegurarse el número de conductores futuros con certeza.
- También se analizaron los tiempos de ejecución para las cuatro comparativas. Se pudo apreciar como los programas fueron más rápidos al resolver problemas deterministas que problemas estocásticos. Además, los tiempos de resolución de problemas para conductores individuales fueron menores que los tiempos de resolución de problemas para conductores individuales y abonados. Se llegó a la conclusión de que conforme aumentaba el número de variables de un problema, aumentaba también el tiempo de ejecución. Esto ocurrió en los distintos problemas y para los distintos algoritmos de optimización. No obstante, y a pesar de la tendencia general, se observó ciertos puntos en los que se rompía la tónica de la misma. Una posible explicación se podría encontrar en que ILOG CPLEX no obtiene los mismos tiempos tras la resolución reiterada de un mismo problema, oscilando dichos

tiempos de una manera aparentemente aleatoria aunque dentro de unos intervalos delimitados.

- Posteriormente, se trabajó con el número total de iteraciones necesarias con el fin de alcanzar la solución óptima para las cuatro comparativas. El número de iteraciones obtenidas al resolver problemas deterministas fue menor que el obtenido al resolver problemas estocásticos. También fue menor el número de iteraciones en problemas sin la presencia de abonados que en problemas con presencia de abonados. Se concluyó, como también ocurrió para los tiempos de resolución, que al crecer el número de variables, crece también el número de iteraciones.
- Por último, se analizó el comportamiento del precio mínimo para aceptar a un grupo de abonados frente al tamaño del mismo. Se demostró que, al aumentar el tamaño del grupo, el precio mínimo también aumentaba, debido a que un mayor número de conductores individuales era rechazado.

Se comentan a continuación una serie de líneas futuras que se podrían emprender como continuación a este proyecto:

- Aplicación práctica real para poder variar los precios de las distintas categorías los últimos días de estudio del problema con la ayuda de los precios duales.
- Modificación del horizonte temporal de los problemas. En este proyecto se utiliza un horizonte temporal en horas. Este horizonte podría ser modificado a medias horas o, incluso, a minutos. En este último caso, el número de variables sería muy elevado, pero conseguiría proporcionar a los conductores un precio más justo y conforme a su estancia en el aparcamiento.
- Cuotas mensuales. Los residentes y comerciantes tendrían que pagar una cierta cuantía económica cada mes para poder mantener sus respectivas tarjetas de residentes y comerciantes. Con estas tarjetas obtienen un precio por hora menor que el que debe pagar un conductor individual normal. Esto supone una nueva función a optimizar y, por tanto, modificaría los modelos estudiados en este proyecto.
- Aplicación de los modelos estudiados a un aparcamiento en superficie (zona azul).