

## Capítulo 6.

### Conclusiones y Líneas futuras.

#### 6.1. Conclusiones.

1. Se ha desarrollado un algoritmo aproximado de resolución rápida del problema de maximizar el número de sincronizaciones de autobuses de distintas líneas que coinciden en nodos cuando se consideran cierto intervalo de espera entre ambos autobuses. Este algoritmo se basa en el desarrollado por Eranki (2004). Se observa una vez que se trabaja con sus parámetros, que este resultaría igualmente válido para el Modelo de sincronización simultánea (sin intervalo de espera) de Ceder (2001), simplemente extrapolando todos los datos, y obviando los diferentes intervalos de tiempo permitido, para cada uno de los nodos. Se ha comprobado, que con dicho algoritmo aproximado, se obtienen los resultados expuestos por Ceder, para los diferentes experimentos tratados.
2. Una de las pautas que queríamos comprobar con este proyecto, radicaba en ver la validez del algoritmo aproximado desarrollado por Eranki. A partir del modelo no lineal de sincronización con intervalo de tiempo de Eranki (2004), se ha desarrollado un modelo lineal que lo resuelve. Igualmente, a partir del modelo no lineal de sincronización simultánea sin intervalo de Ceder (2001) se ha desarrollado un modelo lineal de menos variables y restricciones que si se utiliza el modelo anterior con valores cero en los intervalos. Los resultados óptimos obtenidos en los problemas de tamaño pequeño, son lógicamente mayores o iguales que los obtenidos por el algoritmo aproximado. Sin embargo, el algoritmo da buenos resultados pues la desviación respecto al óptimo es pequeña.

3. Por medio del Modelo de sincronización para un intervalo de tiempo de Eranki, trabajamos con un algoritmo aproximado, que surge de la linealización de dicho modelo. Se observa una vez que se trabaja con sus parámetros, que este resultaría igualmente válido para el Modelo de sincronización simultánea de Ceder, simplemente extrapolando todos los datos, y obviando los diferentes intervalos de tiempo permitido, para cada uno de los nodos. Se ha comprobado, que con dicho algoritmo aproximado, se obtienen los resultados expuestos por Ceder, para los diferentes experimentos tratados.
4. La exactitud del resultado, y por tanto, el valor obtenido de la función objetivo se ve directamente influenciado por el número de variables, y restricciones que tenga el modelo. Se puede comprobar con un aumento de dichos parámetros, los tiempos de CPU se hacen excesivamente extensos, obligando a que la compilación se finalice sin haber llegado al óptimo, se ha tomado en problemas grandes un tiempo máximo de una hora.
5. A la hora de decidir qué paquete de programación exacta utilizábamos para trabajar con los experimentos, decidimos que debido a la complejidad de determinadas redes, utilizaríamos el paquete CPLEX, dejando a un lado el paquete XA, debido a que este último tenía dificultades incluso para llegar siquiera a comenzar a compilar algunos de los experimentos tratados, aparte de que los tiempos de CPU eran mucho mayores.
6. Con cada uno de los experimentos tratados, se ha trabajado bajo la pauta de Ceder y de Eranki, de tal forma que para todos ellos, se ha obtenido un resultado por medio del algoritmo aproximado. Este hecho, no ha plasmado la gran diferencia que existe entre ambos modelos, ya que siendo redes de transporte idénticas, el número de variables y restricciones han disparado cuando se introducen los parámetros del intervalo de tiempo permitidos, para cada nodo establecido por Eranki.

Este factor provoca que el número de variables se dispare superando el triple de las variables que se obtienen bajo el modelo de Ceder, y se dupliquen el número de restricciones existentes. Todo esto provocará que la compilación sea más tediosa, y por tanto los tiempos de CPU aumenten.

7. Trabajando con el Modelo de sincronización simultánea de Ceder, y con el Modelo de sincronización para intervalo de tiempo de Eranki, se demuestra que este último proporciona un mayor número de sincronizaciones; esto se debe a que hemos introducido una holgura en forma de intervalo de tiempo permitido en cada uno de los nodos de la red, permitiendo que exista un rango de posibilidades para que se produzca la sincronización de los distintos autobuses, de las distintas redes; holgura que Ceder desestima, manejando como sincronización válida la simultaneidad.
8. Partiendo de los distintos análisis de sensibilidad realizados, podemos concluir que uno de los puntos clave, a la hora de poder mejorar las sincronizaciones, radica en el límite inferior del intervalo de tiempo permitido en cada nodo. Bajo distintas experimentaciones con una misma red de transporte, se demuestra que aumentar dicho límite inferior, provoca una disminución de las sincronizaciones producidas. Si tenemos un intervalo establecido, y el límite inferior se aumenta, estamos perdiendo las posibles sincronizaciones que se producían entre el límite original, y el nuevo, por lo que en ningún caso mejoramos las sincronizaciones producidas, sino que estamos igualando o empeorando.
9. Con este mismo análisis podemos realizar otra lectura más, ya que si aumentamos el límite inferior, pero mantenemos el superior, el rango de tiempos que existe en el intervalo se ve disminuido, por lo que las sincronizaciones se ven perjudicadas. Por tanto, estamos perdiendo resolución del problema por dos vías.

10. Llegado un punto, el disminuir el rango de tiempos que existe entre los límites inferior y superior, para cada nodo, provoca que el problema deje de ser admisible, dando lugar a que tengamos que manipular el horizonte de planificación, para darle un mayor margen al modelo para lograr que sea admisible, y se pueda producir alguna sincronización a lo largo de la red de transporte.
  
11. Otros de los puntos tratados en el análisis de sensibilidad, radica en la frecuencia de cada ruta, es decir el número de autobuses que se establecen para cubrir la red de transporte. Se observa que al aumentar el número de autobuses, las sincronizaciones mejoran, esto es totalmente lógico, ya que estamos ampliando el rango para que las coincidencias de las distintas rutas se produzcan, ya que existe una mayor probabilidad de que dos autobuses de distintas rutas, lleguen dentro del intervalo al nodo. Esta mejoría no está directamente relacionada con el aumento en el número de autobuses, ya que podemos ver como el seguir aumentando el número de autobuses, provoca que el número de sincronizaciones se estanque.

A lo largo de este proyecto se ha buscado compaginar la minimización de los costes, con la maximización del número de sincronizaciones, por tanto, en el momento que el número de coincidencias en la red de transporte se estanque, debemos parar, ya que estamos aumentando los costes, sin llegar a obtener ningún tipo de rentabilidad para el transporte. El punto donde se logra un número mayor de sincronizaciones, pero pasado el cual nos mantenemos en una constante, es el tope para la red, a partir de este estamos saturando la red con un número de autobuses excesivo, sin lograr que éstos se llenen, y por tanto, sin rentabilidad para la empresa de transporte.

12. Al igual que hemos trabajado modificando, la frecuencia y el límite inferior del rango de tiempo permitido para cada nodo; la siguiente vuelta de tuerca, radicaría en mantener constante el límite inferior, e ir variando el límite superior del rango de tiempo para cada nodo. Si dicha variación va en aumento, es decir mejoramos el rango de tiempos de cada intervalo, las sincronizaciones mejoran, sin embargo, de forma lógica, cuando vamos disminuyendo dicho rango, las coincidencias en cada nodo disminuyen, o bien el problema llega a hacerse inadmisibles. Estos resultados van en consonancia, con todo lo estudiado anteriormente, ya que si vamos limitando el rango de tiempos, las rutas no tienen margen para poder coincidir, y ni tiempo permitido incluso, para llegar a los distintos nodos.

Como conclusión final, se ha desarrollado una herramienta que permite a las empresas de transporte mejorar su planificación de horarios para aumentar las sincronizaciones de sus vehículos en las paradas comunes, incluyendo un intervalo de tiempo de espera si se estima oportuno

## **1.2. Líneas futuras de trabajo.**

En este proyecto se asume que los tiempos de viaje entre nodos son valores deterministas. La realidad sin embargo demuestra la aleatoriedad de los tiempos de viaje y por tanto parece interesante incorporar tiempos aleatorios.

Respecto a los datos de entrada se considera que los autobuses pueden salir de inmediato desde el origen de la línea, pero se podrían incorporar tiempos de preparación de vehículos en la cabecera de la línea.

Finalmente, otras funciones objetivos más fáciles de manejar para ser resueltas mediante heurísticas genéricas (metaheurísticas) podrían ser incorporadas. Por ejemplo, maximizar el número de nodos con sincronizaciones poniendo pesos en la importancia de cada nodo.

