



REGULACIÓN DE TRÁFICO EN REDES DE AUTOBUSES URBANOS

Leonardo G. Hernández-Landa
Romeo Sánchez Nigenda
Yasmin A. Ríos-Solís

Resumen

Frecuentemente, las líneas de transporte urbano se ven afectadas en su programación y distribución de unidades por distintos tipos de percances en el transcurso de la ruta, que puede o no estar bajo control de la empresa. Para muchas empresas la solución a esta falla depende directamente de las habilidades del coordinador de operaciones. Entonces, la reprogramación del coordinador basada en sus conocimientos empíricos difícilmente será óptima, asunto que conlleva a una mala re-planeación/programación. En este trabajo proponemos un modelo para el sistema de apoyo a la toma de decisiones que pueda ser de utilidad para encontrar buenas soluciones, en tiempos adecuados con el uso de algoritmos eficientes para los problemas de regulación de frecuencias de paso y reprogramación de unidades para minimizar la afección a la planeación original.

Palabras clave: Regulación de autobuses, control de tráfico, espera de autobuses.

Introducción

Las grandes ciudades necesitan transportar millones de personas a diario. Esto es un reto para el transporte urbano, ya sea metro, autobuses o ecotaxis. Particularmente hablando de autobuses esta problemática se puede atacar mediante una planeación objetiva de las rutas, unidades y operadores en tono a la demanda. La planeación puede tener éxito en la simulación de laboratorio e incluso en la vida real cuando todos los parámetros y variables funcionan adecuadamente. ¿Qué pasa cuando el itinerario y programación se ven afectados por un suceso inesperado?, nos podemos referir a una falla mecánica en la unidad de servicio, un choque en el trayecto de la ruta, o cualquier otro suceso que afecte el programa establecido y por lo tanto la calidad del servicio.

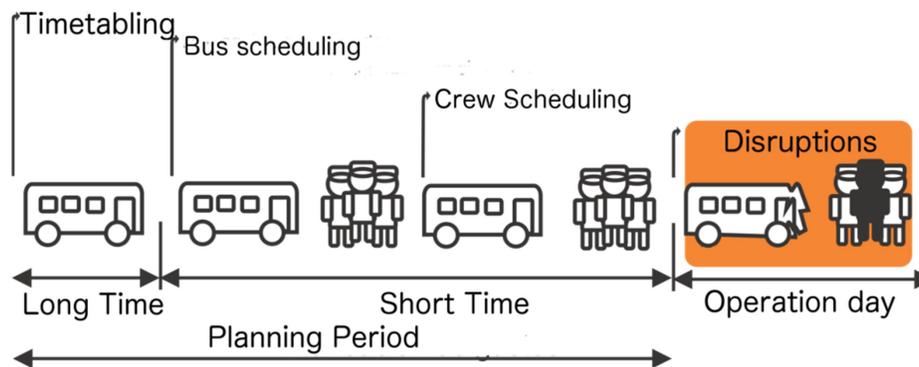


Figure 1: Afecciones de una interrupción a la planificación.

El poder controlar el tráfico de autobuses de servicio urbano es una tarea compleja, desde el punto de vista del analizador, dado que las decisiones tomadas con el fin de regularizar y mejorar el servicio muchas veces terminan entorpeciendo el sistema en general, dado que la acción que se decida en una unidad sin duda alguna repercutirá en las unidades subsecuentes. Más aun, cuando se tiene una interrupción en una unidad en funcionamiento, las decisiones deben ser precisas y rápidas para tratar de no afectar la programación general y el servicio al cliente.

Una de las técnicas más eficientes para controlar el tráfico es la aplicación del problema de Holding bus problem (HBP), que propone tener puntos de control donde la unidad pueda esperar un periodo de tiempo determinado y así regularizar el tráfico.

Revisión de literatura

[Mikhailyuk, 2010] define el concepto de reoptimización como: Dado un problema P y dada una instancia inicial I para la cual existe una solución conocida, una nueva instancia I' del problema P

que es obtenida como resultado de la propuesta de hacer un insignificante cambio en la instancia I . ¿Cómo puede influir la solución óptima de I para encontrar una solución óptima de I' en el caso de que el cambio sea mínimo? El objetivo de la reoptimización al aplicar métodos aproximados cuando se conoce la solución inicial de I es el encontrar una solución de calidad mejorada para la instancia I' en tiempos satisfactorios.

Las investigaciones referentes a este tema se han desarrollado para diferentes giros en la transportación de pasajeros. En el caso de trenes, [Törnquist, 2006] ofrece una visión general de la investigación en la programación y despacho de trenes. Se hace una distinción entre la planificación táctica, la planificación operativa y la reprogramación. Dentro de la reprogramación de aviones en aerolíneas comerciales existe un poco más de investigación. [Clausen et al., 2007] hace una revisión de los problemas relativos a la administración de fallas aéreas y problemática en general, uno de ellos es la reprogramación de la tripulación de aviones, donde después de una perturbación en el horario de la tripulación el objetivo es determinar las nuevas asignaciones de la tripulación que minimicen el impacto sobre la programación original. En transporte de autobuses, la tecnología ha ido incluyendo estos sistemas, tales como el uso de sistemas AVL y conteo, las investigaciones están surgiendo, por ejemplo [Fleischmann et al., 2011] considera un sistema de enrutamiento dinámico que envía una flota de vehículos de acuerdo a los pedidos de clientes que llegan al azar durante el período de planificación. Cada pedido de un cliente requiere de un transporte de un lugar de recogida a una dirección de entrega en un intervalo de tiempo dado. El sistema dispone de la comunicación en línea con todos los controladores y los clientes y, además, de información en línea sobre los tiempos de viaje desde un centro de gestión del tráfico. [Zhang and Tang, 2011] presenta un modelo de reprogramación de un vehículo de enrutamiento cuando ocurre una interrupción en un momento determinado.

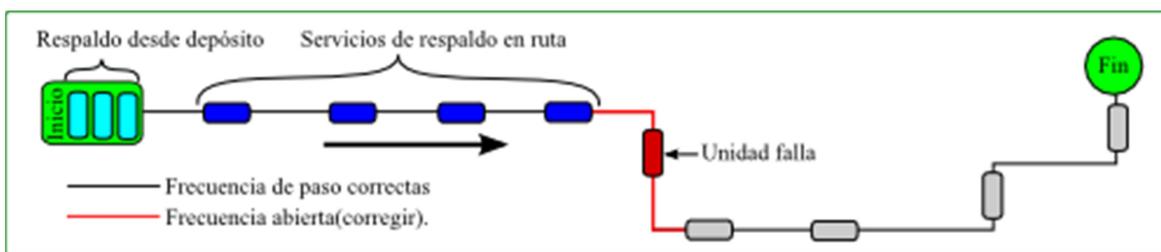


Figura 2: Ejemplo de una falla en ruta.

La reprogramación en autobuses urbanos tiene que ver mucho con los tiempos de llegada como de la regularización de las frecuencias de paso entre estaciones de los buses para garantizar la prestación del servicio y la cobertura de la demanda.

Por otro lado existen técnicas con el propósito de controlar las operaciones para remediar los problemas relacionados con el tráfico y regulación de espaciamientos. Las estrategias de regulación de tráfico en tiempo real se pueden dividir en dos categorías principales: Regulación mediante puntos de control y el control interestaciones, aunque existen otras estrategias, Eberlein et al. (2001).

Entre los trabajos más destacados sobre regulación de tráfico se encuentra [Eberlein, 2001] que define el Holding Bus Problem (HBP) como, dada una red de tránsito y su plan de operaciones, el problema de HBP es decidir en un momento de espera para cada autobús en una estación de control y por cuánto tiempo. [Khoat and Bernard, 2006] regula el tráfico en una ruta después de haber ocurrido una disrupción en la red. [Sun and Hickman, 2008] realiza el mismo trabajo pero desde la perspectiva de establecer el HBP en múltiples estaciones de control para regular estas frecuencias. Otro método poco eficiente tratado en la literatura es el "Skipping stop problem", [Nguyen-Duc Khoat, 2007] desarrolla un modelo para saltar estaciones con la finalidad de regular el tráfico y establecer mejores flujos. [Chen et. al. 2009] muestran una recopilación de técnicas para la rehabilitación del tráfico de autobuses y un conjunto de parámetros de rendimiento con el fin de evaluar la eficiencia de los modelos y algoritmos.

Formulación de modelo

Clásicamente modelos centran su interés en minimizar el tiempo de espera del usuario, ver [Nguyen-Duc Khoat y Sun, 2007], [Hickman, 2008], [Ginkel y Schobel, 2007] y [Xuan et al.,2011], generalmente estos modelos son no lineales y tienden a tener un tiempo de respuesta no satisfactorio, nosotros proponemos concentrar los esfuerzos en mejorar los tiempos de espaciamiento para regular el tráfico de las rutas.

Desarrollamos formulaciones lineales alternativas para mejorar la eficiencia en el tiempo y solución en comparación con algunos modelos en la literatura.

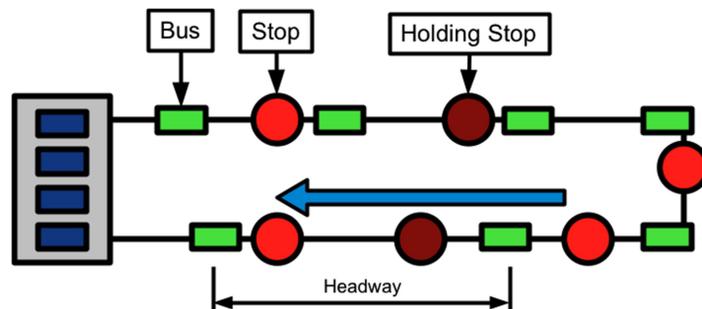


Figura 3: Representación gráfica de HBP.

Se presentan tres distintas formulaciones para el HBP. Antes de establecer los modelos tomamos en cuenta los siguientes supuestos con la finalidad de facilitar el modelado y solución.

1. Se considera una sola ruta de autobuses activos.
2. No se permite el rebasamiento de unidades dentro del sistema.
3. Se incluye capacidad en los autobuses.
4. Los tiempos de salida son previamente determinados.
5. Solo se incluyen en la red los autobuses activos dentro de las paradas de control.

Para fines de mejor comprensión de los tres modelados se utilizara notación genérica que permita observar los cambios en cada modelado y subsecuentemente en cada modelo especificar notación propia de cada uno.

CONJUNTOS

I Conjunto de autobuses en ruta antes de pasar por el punto de control $i=\{1,2,\dots,m-1,m\}$.

VARIABLES

d_i Tiempo de partida de i en el punto de control.

x_i Espaciamiento en tiempo de las partidas de los autobuses en el punto del control denotado por $d_i-d_{(i-1)}$.

$Hold_i$ Tiempo de espera que se aplicará al autobús i en el punto de control.

PARÁMETROS

S Tiempo al momento de la toma de muestra.

t_i Tiempo estimado de viaje de S al punto de control del autobus i .

a_i Tiempo de arribo de autobús i al punto de control, calculado por $S+t_i$.

λ_i Tasa de llegada de pasaje calculada para el autobús i en el punto de control.

MAX_H Tiempo máximo de espera

M Valor auxiliar de valor alto

$PASS$ Pasaje en el bus i

CAP Capacidad del bus

Modelo mediante ventanas de tiempo

El primer modelo que se propone es mediante el uso de ventanas de tiempo, que regulariza las unidades de acuerdo a tiempos de paso máximos $Head^{up}$ y mínimos $Head^{low}$ pre-establecidos

de servicio. Se recurre a la penalización de los espaciamientos si no se cumplen con los tiempos mínimos y máximos de espaciamiento.

La función objetivo la podemos definir como la minimización de la suma de los incumplimientos de los espaciamientos, para esto definimos dos variables auxiliares binarias

$$\gamma_i = \begin{cases} 1 & \text{Si el espaciamiento es mayor a nuestro límite superior } x_i > Head^{up} \\ 0 & \text{Otra cosa} \end{cases}$$

$$\delta_i = \begin{cases} 1 & \text{Si el espaciamiento es menor a nuestro límite inferior } x_i < Head^{low} \\ 0 & \text{Otra cosa} \end{cases}$$

Entonces nuestra función objetivo es:

$$\min \sum_{i \in I} \gamma_i + \sum_{i \in I} \delta_i \quad (1)$$

Sujeto a las restricciones acordes a los supuestos previamente establecidos.

$$x_i = d_i - d_{i-1} \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$x_i \leq Head^{up} + M(\gamma_i) \quad \forall i \in I \quad (3)$$

$$x_i \geq Head^{low} - M(\delta_i) \quad \forall i \in I \quad (4)$$

$$d_i = a_i + \alpha \cdot \lambda_i \cdot x_i + Hold_i \quad \forall i \in I \quad (5)$$

$$d_i \geq d_{i-1} \quad i = \{1, \dots, m-1\} \quad (6)$$

$$Hold_i \leq MAX_H \left(1 - \frac{PASS}{CAP}\right) \quad \forall i \in I \quad (7)$$

$$d_i, x_i \quad \mathbb{R}^+ \quad (8)$$

$$Hold_i \quad \mathbb{N}^+ \quad (9)$$

$$\gamma_i, \delta_i \quad \{0,1\} \quad (10)$$

La restricción (2) es el espaciamiento entre el autobús i y el anterior $i-1$, determinado por sus tiempos de partida del punto de control. En las ecuaciones (3) y (4) definimos que nuestro espaciamiento debe ser menor o superior a nuestras cotas permitidas, si estas no se cumplen se activa penalización para γ_i o δ_i respectivamente. Para (5) planteamos nuestro proceso de espera en el punto de control. La ecuación (6) evita que nuestras unidades se rebasen entre sí. En (7) limita nuestro tiempo de espera para el autobús i en el punto de control acorde a la capacidad del autobús y un tiempo máximo de espera. Finalmente (8), (9) y (10) son la pertenencia de nuestras variables.

Este modelo se define como un modelo entero lineal mixto, el cual a diferencia del modelo usado en la literatura es más fácil de solucionar.

Modelo mediante minimización de la varianza

La segunda propuesta se enfoca a minimizar las varianzas de los espaciamientos, esta propuesta se enfoca principalmente a darle libertad de cierre y apertura en las frecuencias de paso, tomando en cuenta la demanda a su vez, el efecto de minimizar los espaciamientos entre autobuses provoca que las frecuencias de paso se mantengan lo más equidistantes posibles con respecto al tiempo de espera del cliente.

La función objetivo la definimos como la minimización de la varianza de los tiempos de paso como se muestra

$$\min \sum_{i \in I} (x_i - \mu)^2 \quad (11)$$

Donde μ esta definida dentro de la restricción (12) como el valor esperado de los espaciamientos calculados. Se presenta el conjunto de restricciones del modelo con el cálculo del valor esperado (12) y donde (13), (14), (15), (16), (17), (18) y (19) fueron definidas en el modelo anterior.

$$\mu = \frac{\sum_{i \in I} x_i}{n} \quad (12)$$

$$x_i = d_i - d_{i-1} \quad \forall i \in I \quad (13)$$

$$d_i = a_i + \alpha \cdot \lambda_i \cdot x_i + Hold_i \quad \forall i \in I \quad (14)$$

$$d_i \geq d_{i-1} \quad i = \{1, \dots, m - 1\} \quad (15)$$

$$Hold_i \leq MAX_H \left(1 - \frac{PASS}{CAP} \right) \quad \forall i \in I \quad (16)$$

$$d_i, x_i \quad \mathbb{R}^+ \quad (17)$$

$$Hold_i \quad \mathbb{N}^+ \quad (18)$$

$$\gamma_i, \delta_i \quad \{0,1\} \quad (19)$$

Modelo mediante diferencia de desviaciones

Como podemos observar la función objetivo del modelo de uso de varianza (11) está en términos cuadráticos, en [Yu and Li, 2000] se discute el esfuerzo computacional requerido de una formulación de este tipo, debido al termino cuadrático demuestran la dificultad de solución y proponen una desviación absoluta en vez del termino cuadrático. Se presenta una alternativa del modelo de varianzas con una transformación de manera que se enfoque a reducir las desviaciones estándar como se muestra a continuación.

$$\min \sum_{i \in I} |x_i - \mu| \quad (20)$$

Esta formulación (20) sigue siendo no lineal, pero se puede linearizar añadiendo dos variables auxiliares adicionales, Q_i^+ y Q_i^- . Donde Q_i^+ se interpreta como el monto del cual x_i excede a μ , mientras que Q_i^- es el monto del cual μ excede a x_i . Añadiendo la restricción de activación nuestra modelación quedaría con la función objetivo de la siguiente manera.

$$\min \sum_{i \in I} Q_i^+ + Q_i^- \quad (21)$$

Con las mismas restricciones en el modelo de minimización de varianzas añadiendo la ecuación (22), que en cuyo caso representa las desviaciones de los espaciamientos.

$$x_i - \mu = Q_i^+ - Q_i^- \quad \forall i \in I \quad (22)$$

$$x_i = d_i - d_{i-1} \quad \forall i \in I \quad (23)$$

$$\mu = \frac{\sum_{i \in I} x_i}{n} \quad (24)$$

$$d_i = a_i + \alpha \cdot \lambda_i \cdot x_i + Hold_i \quad \forall i \in I \quad (25)$$

$$d_i \geq d_{i-1} \quad i = \{1, \dots, m-1\} \quad (26)$$

$$Hold_i \leq MAX_H \left(1 - \frac{PASS}{CAP} \right) \quad \forall i \in I \quad (27)$$

$$d_i, x_i \quad \mathbb{R}^+ \quad (28)$$

$$Hold_i \quad \mathbb{N}^+ \quad (29)$$

$$\gamma_i, \delta_i \quad \{0,1\} \quad (30)$$

La última formulación es la simplificación del trabajo [Li et al., 2007], que es de los modelos más populares en la literatura referente a control de tráfico, cuya función objetivo se enfoca a minimizar el cuadrado de los tiempos de espaciamiento, multiplicado por la tasa de llegada de los pasajeros a la parada de servicio, esto tiene como objetivo enfocarse a la calidad de servicio al cliente.

Se define la función objetivo (31) de manera que se minimice el tiempo de espera del cliente en las estaciones de control u Holding.

$$\min \sum_{i \in I} \lambda * (x_i)^2 \quad (31)$$

$$x_i = d_i - d_{i-1} \quad \forall i \in I \quad (32)$$

$$d_i = a_i + \alpha \cdot \lambda_i \cdot x_i + Hold_i \quad \forall i \in I \quad (33)$$

$$d_i \geq d_{i-1} \quad i = \{1, \dots, m - 1\} \quad (34)$$

$$Hold_i \leq MAX_H \left(1 - \frac{PASS}{CAP} \right) \quad \forall i \in I \quad (35)$$

$$d_i, x_i \quad \mathbb{R}^+ \quad (36)$$

$$Hold_i \quad \mathbb{N}^+ \quad (37)$$

$$\gamma_i, \delta_i \quad \{0,1\} \quad (38)$$

Resultados y conclusiones

Las instancias fueron generadas sobre la base de una simulación para reproducir el comportamiento de las rutas de autobuses, donde se consideró un punto de control. Las posiciones de los autobuses fueron generados aleatoriamente en referencia a los tiempos esperados de espaciamiento. El depósito es el punto de partida y el final. Para esta experimentación preliminar consideramos 10 autobuses, un punto de control, un α de 0.1, y MAXH de 3 unidades de tiempo. Se generan aleatoriamente varias repeticiones con el fin de validar el comportamiento de los modelos. Se usó el método de ramificación y acotamiento implementado por CPLEX 12.1 en un OS X con 2.53 Ghz de procesador y 4 GB de RAM.

La Tabla 1 muestra los resultados de esta experimentación preliminar, la primera columna muestra el nombre de los modelos de acuerdo al basado en la literatura, ventanas de tiempo y el riesgo mínimo, y la experimentación con la inclusión de acotamiento en holding, la segunda y tercera columnas muestran el espaciamiento máximo y mínimo, la cuarta y quinta columna los son la media y la desviación estándar de los tiempos de espaciamiento, esto muestra cómo se distribuyen los espaciamientos, y las tres últimas columnas se trata a los pasajeros con la media, la desviación estándar y finalmente la suma de los pasajeros acumulados por formulación.

La tabla 2 Muestra las mismas características que la tabla 1 pero en esta omitimos la restricción de limite de espera.

Modelo	Max X	Min X	Media	DS	Media Pasaje	DS Pasaje	Pasaje Máximo	Suma Pasaje
Literatura	14.44	0.73	5.78	0.57	13.81	2.53	47.80	<u>1381.09</u>
Ventanas tiempo	16.25	0.34	5.84	0.76	14.87	3.63	64.51	1487.23
Riesgo mínimo	13.60	0.88	5.98	0.32	14.27	2.74	53.99	1426.93

Tabla 1: Tabla de resultados promedio de experimentación con inclusión de límite de espera con 10 repeticiones

Modelo	Max X	Min X	Media	DS	Media Pasaje	DS Pasaje	Pasaje Máximo	Suma Pasaje
Literatura	13.55	0.88	5.78	0.45	13.39	2.96	47.80	<u>1339.39</u>
Ventanas tiempo	16.79	0.00	6.06	0.77	15.08	2.90	56.25	1507.58
Riesgo mínimo	13.76	2.42	6.13	0.55	14.35	3.27	53.16	1434.94

Tabla 2: Tabla de resultados promedio de experimentación sin límite de espera con 10 repeticiones

Podemos ver que las formulaciones propuestas en este trabajo tienen un mejor rendimiento en comparación con los modelos en la literatura, estas formulaciones absorben más usuarios y reducen la desviación del error en los afluentes de cabecera, esto significa que tenemos una buena distribución con el fin de satisfacer al usuario y evitar intervalos grandes o pequeños.

Otra observación importante es cuando omitimos la restricción del límite de espera, este tiende a captar más pasaje dada la libertad de manejo de tiempos, sin embargo esto afecta directamente a la distribución de las unidades lo cual deprecia la calidad hacia el cliente.

Un ejemplo gráfico de una línea sin control y una sin control se pueden ver en las figuras

Tabla de frecuencias sin Holding

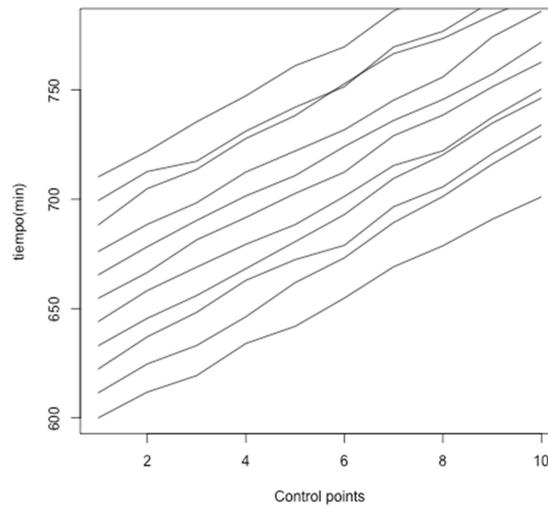


Tabla de frecuencias con Holding en 4

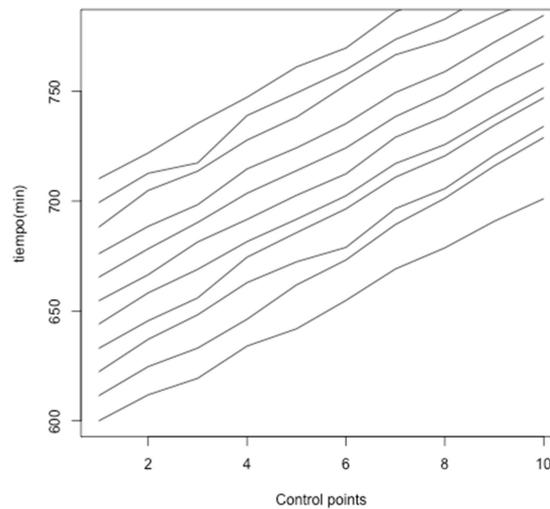


Figura 4: Comparación de líneas de autobuses sin control y con especificación en la parada 4 como punto de control a lo largo del tiempo.

Básicamente las formulaciones se adaptan a las preferencias del tomador de decisiones y a que tanta libertad puede darle al sistema para captar más pasajeros o controlar los tiempos de paso.

Como desarrollo futuro y en proceso se está considerando el uso de múltiples puntos de control, dada la inherente necesidad de implementar más de un punto de control, además se está probando la combinación de otras técnicas de control de tráfico y rehabilitación de líneas como el “skipping stop problem” y la inserción de autobuses en la línea.

Referencias

- [Clausen et al., 2007] Clausen, J., Larsen, A., and Larsen, J. (2007). Disruption management in the airline industry – concepts, models and methods. Technical University of Denmark, page 47.
- [Fleischmann et al., 2011] Fleischmann, B., Gnutzmann, S., and Sandvoß, E. (2011). Dynamic vehicle routing based on on-line traffic information. Universität Augsburg.
- [Guihaire and Hao, 2008] Guihaire, V. and Hao, J.-K. (2008). Transit network re-timetabling and vehicle scheduling. *Modelling, Computation and Optimization*, 2008(14):135–144.
- [Khoat and Bernard, 2006] Khoat, N. and Bernard, D. (2006). Rescheduling in the urban transportation networks. In *Computational Engineering in Systems Applications, IMACS Multiconference on*, volume 1, pages 953–959. IEEE.
- [Li et al., 2007] Li, J., Borenstein, D., and Mirchandani, P. (2007). A decision support system for the single-depot vehicle rescheduling problem. *Computers & operations research*, 34(4):1008–1032.
- [Li et al., 2010] Li, J.-Q., Mirchandani, P. B., and Borenstein, D. (2010). Parallel auction algorithm for bus rescheduling. *Departament od Systems and industrial Engineering*.
- [Mikhailyuk, 2010] Mikhailyuk, V. (2010). Reoptimization of set covering problems. *Cybernetics and Systems Analysis*, 46:879–883.
- [Nguyen-Duc Khoat, 2007] Nguyen-Duc Khoat, D.-G. B. (2007). The real-time stop-skipping in the urban transportation networks. *CONFERENCE ON MANAGEMENT AND CONTROL OF PRODUCTION AND LOGISTICS*, page 6.
- [Sun and Hickman, 2008] Sun, A. and Hickman, M. (2008). The holding problem at multiple holding stations. *Computer-aided Systems in Public Transport*, pages 339–359.
- [Törnquist, 2006] Törnquist, J. (2006). Computer-based decision support for railway traffic scheduling and dispatching: A review of models and algorithms. *Dagstuhl Research Online Publication Server*.
- [Yan Fang and Miao, 2010] Yan Fang, Xiangpei Hu, L. W. and Miao, Y. (2010). A real-time scheduling method for a variable-route bus in a community. *Advances in intelligent decision technologies*, 4:239–247.
- [Yu and Li, 2000] Yu, C. and Li, H. (2000). A robust optimization model for stochastic logistic problems. *International Journal of Production Economics*, 64(1):385–397.
- [Zhang and Tang, 2011] Zhang, X. and Tang, L. (2011). Disruption management for the vehicle routing problem with time windows. *CCIS 2*.