Diseño de un modelo de asignación de turnos para la operación de sistemas de transporte masivo tipo BRT

Diego F. Quintero-Moncada
Universidad de La Sabana, Chía, Cundinamarca, Colombia, diegoqumo@unisabana.edu.co

Carlos L. Quintero- Araújo
Universidad de La Sabana, Chía, Cundinamarca, Colombia, carlosqa@unisabana.edu.co

ABSTRACT

The schedule of buses and drivers for all companies operating in a massive transportation system is a problem that must be solved daily. Many changes in daily tasks are based on route programming, either because of the requirements between the same or additional services to be performed, so this becomes a problem very difficult to solve. Therefore, it is very important to develop decision support tools based on operational research techniques for solving the rostering problem and the assignment of drivers to the buses, satisfying each of the legal, techniques and safety requirements for this kind of labor.

Keywords: Drivers Rostering, Shift Scheduling, Branch and Price, Column Generation.

RESUMEN

La programación diaria de autobuses y conductores para todas las compañías de transporte que operan en un sistema masivo es un problema de asignación que se debe resolver a diario. El trabajo de cada día cambia sobre una base de programación de rutas, ya sea debido a los requerimientos entre las mismas o por servicios adicionales que se deben realizar, por lo cual se convierte este en un problema de programación a resolver. Por lo tanto, es de gran valor desarrollar herramientas de soporte para la toma de decisiones sobre la asignación y rotación de conductores, las cuales deben cumplir cada una de las obligaciones legales, técnicas y de seguridad para dicha labor.

Palabras clave: Rotación de Conductores, Programación de Turnos, Branch and Price, Generación de columnas.

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento del transporte masivo está asociado al crecimiento poblacional, y es una de las alternativas frente a las crecientes congestiones de tránsito y al mejoramiento del medio ambiente. Estos sistemas de transporte surgen como respuesta a las concretas prohibiciones de uso de vehículos particulares en algunas ciudades y para la correcta administración de la movilidad. A partir de este nuevo esquema de transporte, la investigación de operaciones hace uso de la modelación matemática para el estudio e implementación de métodos eficientes que optimicen los problemas de programación y asignación del sistema, cumpliendo con las normas y restricciones específicas del mismo mejorando la flexibilidad de operación del sistema.

Por las altas congestiones vehiculares y la deficiencia del transporte público, en Colombia se adoptó como política pública la transformación de los sistemas de transporte urbano en las principales ciudades del país. A través del CONPES 3167 del 2002 se establece la política para mejorar el servicio de transporte público urbano de pasajeros, la cual principalmente define para ciudades con población superior a los 600.000 habitantes, implantar sistemas integrados de transporte masivo (SITM), bajo un esquema de carriles destinados en forma exclusiva para

la operación de buses de alta capacidad, con integración física y tarifaria, con rutas alimentadoras, operación y control sistematizado y la vinculación de capital privado para la operación de buses y tecnología
Un elemento primordial, en una operación de transporte masivo es administrar óptimamente sus recursos, por lo tanto, diseñar los turnos y generar una adecuada rotación de conductores, es determinante para el cumplimiento de los recorridos, seguridad y confiabilidad de la operación. Al tratarse de un problema complejo de administración, la utilización de la investigación de operaciones es una herramienta viable para modelar la situación y realizar la optimización del problema. Para el caso, reconociendo las particularidades propias de la programación de turnos, la investigación se desarrollará acorde con las características del servicio de transporte masivo troncal prestado por el sistema. En este sentido, la aplicación de la investigación de operaciones en el modelo consolidado, proporcionará una representación de la situación real, que permita manipularse en su comportamiento y, agregue los análisis requeridos para la toma de decisiones técnicas requeridas en la administración de este tipo de operaciones.

2. ESTADO DEL ARTE

Programar la realización de algún evento o una actividad se torna gradualmente más difícil con el incremento del número de variables a ser programadas y con el aumento de las restricciones del problema. Para el caso, de una programación de tripulaciones se tiene como entradas la programación de los vehículos, las normas operacionales y la legislación laboral, las cuales a su vez serán tenidas en cuenta en el problema de asignación. El problema de asignación de tripulaciones (*Crew Scheduling Problem* – CSP) consiste en asignar tripulaciones para un cumplimiento de rutas en un sistema de transporte. El CSP es un concepto de asignación para una predeterminada asignación de vehículos de tipo NP-hard, y la construcción de esta asignación es una tarea complicada a realizar porque varía según la demanda y la cantidad de tripulaciones disponibles en un periodo determinado. El CSP es un proceso que se puede construir a partir de dos principios: cubrimiento de conjuntos (*Set Covering Problem* – SCP) y particionamiento de conjuntos (S*et Partitioning Problem* – SPP).

Para el caso del transporte, un método muy utilizado es el cubrimiento de conjuntos o *set covering*, el cual tiene como principio satisfacer la demanda a partir de la asignación de una cantidad de conductores en un periodo determinado. Este problema es adecuado para la asignación de turnos y envuelve la planeación en intervalos de tiempos en los cuales se tiene en cuenta los tiempos de trabajo, descanso y relevo para un grupo de conductores. Para la solución de este problema generalmente se utilizan métodos lineales, heurísticos y/o metaheurísticos obteniendo diferentes resultados dependiendo de la complejidad y restricciones a cumplir en cada uno.

Uno de los problemas a resolver en el SCP es la generación de turnos para el cubrimiento de demanda, uno de los métodos utilizados para encontrar la solución es el algoritmo *Branch & Price* con generación de columnas, el cual es usado por varios autores para la solución de problemas de asignación de personal a turnos de trabajo. *Branch & Price*, parte de la solución del método de generación de columnas que es reconocido en la literatura como una estrategia de solución para cierto tipo de problemas lineales de gran escala y toma mayor relevancia cuando se considera su aplicación dentro de estrategias para la solución de problemas enteros o mixtos. (Maya, 2008).

Este algoritmo funciona en primera instancia mediante la implementación del problema auxiliar *Pricing Problem*, el cual genera la evaluación de las columnas que deben adicionarse a la base inicial hasta dar solución a la relajación del problema. La segunda instancia es la ramificación o *Branching*, la cual ocurre cuando no pueden hallarse columnas para adicionar a la base inicial y la solución del problema relajado no satisface las condiciones de integralidad. Estas instancias dan como resultado la minimización del costo de la función objetivo del problema lineal planteado (Titiyesvska, 2006).

Asociado al problema de asignación de conductores está el problema de rotación de turnos de trabajo el cual es una tarea que consiste en asignar un número de empleados a intervalos de tiempo previamente establecidos cada día de la semana respetando una serie de restricciones laborales que dependen del campo de aplicación (Ernst, 2004). Cada turno está compuesto por una serie de tareas previamente asignadas con sus respectivos tiempos de descanso, y la secuencia de asignación en varios turnos de una semana genera un horizonte planeado llamado *roster*. Los turnos se pueden caracterizar por los intervalos de tiempo en los que se encuentran o por el tipo de tarea a realizar. Según, (Pradenas, Hidalgo & Jensen, 2008) el desafío es encontrar asignaciones eficientes que permitan cumplir con la demanda existente a un costo aceptable, y al mismo tiempo evitando violar contratos laborales o restricciones legales.

El problema de rotación de turnos consiste en la construcción de un calendario para las tripulaciones de cualquier empresa de bien y/o servicio, planeado en una longitud de tiempo, usualmente para siete (7) días, que permita cubrir los turnos programados por el área de planeación para el cumplimiento de la demanda. Este problema generalmente tiene como objetivo minimizar la penalización del incumplimiento de las restricciones del modelo, partiendo con la asignación exacta de las tripulaciones con el fin de no generar un incremento en el costo de la operación. Un ejemplo es el problema de programación de conductores el cual busca generar ocupaciones únicas por día, mientras algunas restricciones tienen que ser satisfechas, tales como la duración del turno y la frecuencia de las pausas dentro del mismo. Después de resolver este problema, se genera una lista para cada conductor, que se caracteriza por la optimización máxima de los conductores, mínima diferencia de horas extras entre todos los conductores, y un mínimo número de funciones no asignadas. (Xie, Kliewer, & Suhl, 2012)

El problema de rotación bajo estudio puede tener un sin número de restricciones pero puede resolverse a partir de funciones multiobjetivo que represente la mejor solución tanto para los conductores como para la compañía. Este es un problema complejo similar al SSP, un ejemplo similar es el de la compañía aérea de transporte de (Cappanera & Gallo, 2004) y los turnos de enfermeras en un hospital (Moz & Pato, 2006). Dependiendo de la complejidad del problema y la dimensión de sus variables, el método a utilizar ya sea programación lineal o programación heurística, pueda ser la herramienta más apropiada para llevar con éxito la solución del problema (Moz, Pato, & Respicio, 2007).

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema en estudio consiste en diseñar un modelo de soporte a la toma de decisiones con énfasis en modelos matemáticos para la asignación de turnos a conductores que optimice una operación de transporte masivo urbano de pasajeros. A partir de este objetivo, la estrategia que se desarrollará para dar solución al problema planteado es la siguiente:

1. Desarrollar un modelo matemático basado en el modelo de *set covering problem* que utilice para la solución el modelo de generación de columnas con el algoritmo *Branch & Price* para la generación de los turnos posibles con la cantidad de conductores necesarios que cubran la demanda.
2. Con base en los resultados obtenidos en el modelo anterior, se desarrollará un modelo matemático de programación lineal para resolver el problema de la rotación de conductores para una semana.

3.1 Modelo Matemático De Generación De Turnos

Para dar respuesta al problema de generación de turnos se diseña un modelo basado en el problema del set covering problem:

Sean:

$I = \text{Periodos } \{1,2,\ldots,40\}$

$J = \text{Turnos posibles } \{N1, N2, N3 \ldots, N\}$

$DEMANDA_{(I)}$=Número de conductores trabajando en un periodo habilitado

$MAX\_DEMANDA_{(I)}$=Número máximo de conductores trabajando en un periodo habilitado

$MIN\_COND\_DESC_{(I)}$=Número mínimo de conductores en descanso en un periodo habilitado

$MAX\_COND\_DESC_{(I)}$=Número máximo de conductores en descanso en un periodo habilitado

$A_{(I,J)}$=Matriz de 1 y 0:1 si el periodo I es un periodo de trabajo para un turno J de lo contrario 0

$B_{(I,J)}$=Matriz de 1 y 0:1 si el periodo I es un periodo de descanso para un turno J de lo contrario 0

Las decisiones a tomar se pueden representar mediante las siguientes variables de decisión:

X_J Variable positiva de cantidad de conductores a asignar en un turno J

M_{IJ} Variable entera de cantidad de conductores a descansar en un periodo I para un turno J

El problema de generación de turnos puede ser formulado de la siguiente manera:

$$\text{MIN}(Z) = \sum_{J} C(J) * X(J) \qquad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{J} A_{(I,J)} * X_{(J)} - \sum_{j \in B_{(I,J)}} M_{(I,J)} \geq \text{DEMANDA}(I); \forall_I \qquad (2)$$

$$\sum_{J} A_{(I,J)} * X_{(J)} - \sum_{j \in B_{(I,J)}} M_{(I,J)} \leq \text{MAX\_DEMANDA}(I); \forall_I \qquad (3)$$

$$\sum_{J} B_{(I,J)} * X_{(J)} \geq \text{MIN\_COND\_DESC}_{(I)}; \forall_I \qquad (4)$$

$$\sum_{J} B_{(I,J)} * X_{(J)} \leq \text{MAX\_COND\_DESC}_{(I)}; \forall_I \qquad (5)$$

La ecuación (1) expresa la función objetivo, en la cual se busca minimizar el número de conductores asignados por turno, donde C_J es la suma de los periodos asignados a cada turno generado, asumiendo que todos los periodos tienen el mismo valor. En la ecuación (2) se garantiza el cumplimiento de la demanda para un periodo determinado siempre y cuando en la generación de turnos se encuentre habilitado el periodo para ese turno particular. Además se obtiene el número de conductores que pueden descansar en un periodo habilitado para dicha labor. La ecuación (3) garantiza que en un periodo habilitado dentro de un turno no se asigne una mayor cantidad de conductores a la establecida por el modelo. La restricción de la ecuación (4), garantiza que exista un número mínimo de conductores descansando en un periodo habilitado para descansar. Para nuestro caso este valor será cero (0). La restricción de la ecuación (5), garantiza un máximo número de conductores descansando en un periodo habilitado para descansar.

3.2 Modelo Matemático De Rotación Y Asignación De Turnos

Para dar respuesta al problema de rotación y asignación de turnos se diseñó un modelo en programación lineal basado en los resultados obtenidos del modelo anterior el cual proporciona número de turnos, duración de cada turno y cantidad de conductores por cada uno. Para ello se establecieron las siguientes variables y parámetros los cuales serán descritos a continuación.

Sean:

$\mathbf{I} = \text{Conductores}\ \{C1, C2, \ldots, C\}$ El número de conductores dependerá de la cantidad de empleados asignados por el modelo de generación de turnos.

$\mathbf{J} = \text{Días de la semana}\ \{L, M, Mi, J, V, S, D\}$

$\mathbf{K} = \text{Turnos posibles}\ \{T1, T2, T3 \ldots Tn\}$ El número de turnos dependerá de la cantidad de turnos generados por el modelo de generación de turnos

$\text{DEMANDA_REQ}_{(J,K)} = $ Número de conductores que se necesitan en turno K para un día J

$$MODALIDADES_{(K)} = \text{Número de periodos de media hora en un turno}$$

$$MODALIDADES\_DIA_{(K,J)} = \text{Matriz de 1 y 0; 1 si el turno K está habilitado en el dia J 0 sino}$$

$$P_{(K,J)} = \text{Peso de un turno J en un día K}$$

Sea $X_{I,J,K}$ una variable binaria que vale 1 si el conductor i es asignado al día j en el turno k, 0 en caso contrario, el modelo de asignación y rotación puede ser formulado de la siguiente manera:

$$MIN\ (Z) = T_{max} - T_{min}\ (6)$$

Sujeto a:

$$Tmin - \sum_{K}^{N}\sum_{J}^{M} P_{(K,J)} * X_{(I,J,K)} \leq 0\ ;\ \forall_I\ (7)$$

$$Tmax - \sum_{K}^{N}\sum_{J}^{M} P_{(K,J)} * X_{(I,J,K)} \geq 0\ ;\ \forall_I\ \ (8)$$

$$\sum_{I} X_{(I,J,K)} = DEMANDA\_REQ_{(J,K)}\ ;\ \forall_J\ \forall_K\ (9)$$

$$\sum_{K \in Modalidades\_dia_{(k,j)}} X_{(I,J,K)} \leq 1\ ;\ \forall_I\ \forall_J\ \ (10)$$

$$\sum_{K \in Modalidades_{dia\ (k,j)}}^{N}\ \sum_{J}^{M} Modalidades_{(K)} * X_{(I,J,K)} \geq Min\_Medias\_Horas;\ \forall_I\ (11)$$

$$\sum_{K \in Modalidades_{dia\ (k,j)}}^{N}\ \sum_{J}^{M} Modalidades_{(K)} * X_{(I,J,K)} \leq Max\_Medias\_Horas\ ;\ \forall_I\ (12)$$

$$\sum_{J} X_{(I,J,K)} \leq 3\ ;\ \forall_I\ ,\forall_K = Tn\qquad (13)$$

$$X_{(I,S,K)} + X_{(I,D,K)} \leq 1;\ \ \forall_I\ ,\forall_K\ (14)$$

$$X_{(I,J,Tn)} + X_{(I,J+1,T1)} \leq 1\ ;\ \forall_I\ \forall_J\ \ (15)$$

La ecuación (6) expresa la función objetivo, la cual busca minimizar el número de veces que se incumplen las restricciones del modelo matemático de rotación de turnos según la demanda y el peso de cada turno. Las ecuaciones (7) y (8) buscan minimizar y maximizar el número de veces que se asigna un conductor a un turno teniendo en cuenta el peso de este para un día en específico. Las ecuaciones (9) garantizan el cumplimiento de la demanda para un turno siempre y cuando el turno se encuentre habilitado para ese día en específico. Las ecuaciones (10) garantizan que un conductor sea asignado máximo a un turno en un día siempre y cuando el turno este habilitado para ese día. Las ecuaciones (11) y (12) aseguran que un conductor realice un mínimo y máximo número de medas horas a la semana, garantizando que realice máximo 6 días de trabajo en la misma. Las ecuaciones (13), garantizan que un conductor realice máximo tres (3) turnos nocturnos con el objetivo de realizar un equilibrio por el mayor peso que tiene este turno en la legislación laboral. Se debe tener en cuenta que el turno Tn dependerá del último turno que resulte del modelo de generación de turnos. La restricción (14), garantiza que un conductor durante el mes de trabajo al menos descanse un domingo. Las ecuaciones (15), aseguran la consecutividad en la cual no se permite que un conductor luego de realizar el último turno Tn en el día presente al siguiente día realice el primer turno.

4. METODOLOGÍA

Para desarrollar el modelo matemático de generación de turnos se plantea un algoritmo basado en una estrategia Branch & Price con generación de columnas. El objetivo de la estrategia es mejorar la solución a través un proceso de iteración teniendo en cuenta la satisfacción de las restricciones del modelo en programación lineal. A continuación se describirán los pasos desarrollados por el algoritmo.

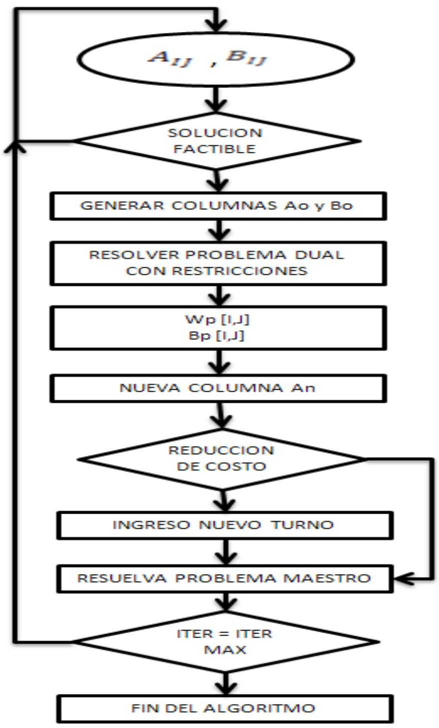

Figura 1: **Diagrama de flujo del algoritmo**

Paso 1: Al inicio del algoritmo, las matrices A_{IJ} y B_{IJ} están definidas con lo cual el procedimiento inicia con un subconjunto de turnos posibles para el problema. Estos turnos a partir del modelo de generación de columnas son evaluados por el modelo de programación con las respectivas restricciones, y del cual se obtendrá una solución inicial factible.

Paso 2: Con la solución factible encontrada, se construye un conjunto de columnas teniendo en cuenta una columna inicial $A_0 = \{a_{IJ}: i \in T, j \in J^{´}\}$, la cual es una solución factible del problema de programación lineal. El conjunto inicial A_0, es la matriz que representa una solución inicial con un conjunto de turnos validos y una matriz de descanso con los valores definidos en el modelo $B = \{b_{IJ}: i \in T, j \in J^{´}\}$, y el vector de costo $C_J; j \in J$.

Paso 3: Usando el método simplex, se resuelve las restricciones del problema maestro planteado en el modelo que tenga la menor demanda.

Paso 4: Usando las variables duales encontradas del problema lineal inicial u_1^*, u_2^*, w_1^* y w_2^*, se realiza el cálculo de los valores para la generación de las nuevas columnas.

Paso 5: Luego de obtener el resultado, se resuelve el subproblema en el algoritmo encontrando una columna N que represente un turno valido con un valor reducido del costo. Si el turno no es válido esto quiere decir que no existe una reducción del costo, el algoritmo seguirá al punto 6. De lo contrario, la nueva columna N es ingresada a la matriz A. Seguidamente, el nuevo conjunto será $A = (A, N), J^{´} = J^{´} \cup \{turno\ nuevo\}$ y se construye una nueva solución sobre la base de una nueva matriz de descanso B y un vector de costo c definido en la programación de turnos del algoritmo. El algoritmo se devuelve al paso 2 hasta repetir las iteraciones deseadas en el mismo. La tabla número dos, expresa en un diagrama de flujo los pasos de la heurística numero 1.

Paso 6: Resuelva el problema maestro con los turnos asignados.

Paso 7: Luego de crear el turno y ser asignado como una nueva solución se realizará una reducción del costo de la función objetivo evaluando el tipo de turno escogido por el algoritmo previamente planteado en los pasos anteriores. Este ciclo de evaluación permite disminuir el costo ya que el algoritmo realiza las iteraciones necesarias para eliminar turnos ya predefinidos y establecer nuevos que permitan mejorar el número de conductores por periodo y minimización de la función objetivo.

Paso 8: Luego de realizar las iteraciones predefinidas en el modelo matemático el algoritmo termina entregando la mejor solución posible con una reducción del costo a la solución inicial.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los modelos matemáticos se desarrollaron bajo el lenguaje de programación del software de modelamiento algebraico GAMS en su versión 21.1, en un equipo de cómputo con procesador AMD Turión 64 y memoria RAM de 4 Gigabytes. El tiempo de simulación del modelo de generación tiene una ejecución menor a un minuto con una respuesta óptima y factible; el modelo de rotación y asignación de turnos tiene una duración de simulación de diez minutos promedio, el cual se incrementa dependiendo del número de variables a solucionar con una respuesta óptima. A continuación, en la Figura 2, se muestra el resultado obtenido de la simulación del algoritmo *Branch & Price* para una configuración de turnos de ocho (8) horas y la demanda establecida para una sola iteración del mismo. A partir de esta, se puede observar el cumplimiento de la demanda de conductores requeridos por periodo y se obtiene el posible número de empleados tomando descanso en un periodo habilitado de la matriz B_{IJ}. El total de conductores a utilizar para un día ordinario es de 44, con un número máximo de once (11) conductores descansando en los periodos habilitados para cada turno. Para esta configuración el costo de la función objetivo es de 704.

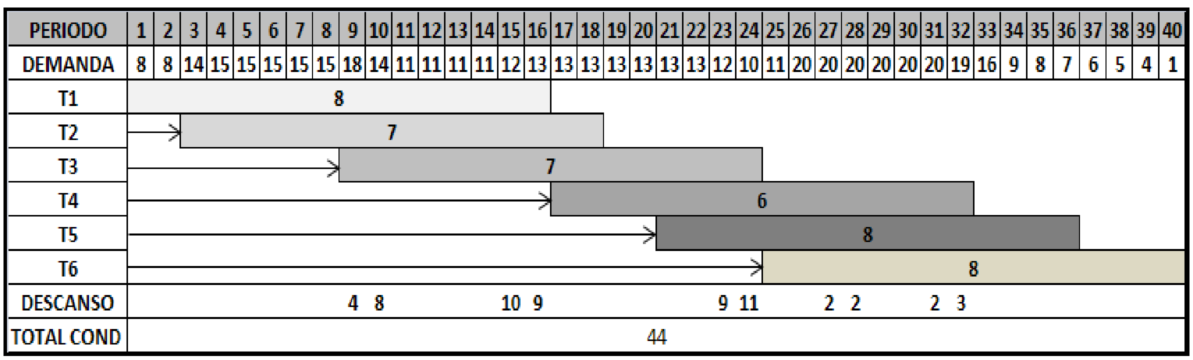

Figura 2: Programación de turno de ocho (8) horas (Iteración =1)

Teniendo en cuenta que la solución del modelo es factible, se decide realizar cambios en el valor de la demanda para verificar la adaptabilidad del algoritmo a diferentes variaciones de esta. Esto con el objetivo de comprobar que el modelo es capaz de entregar soluciones según los requerimientos del servicio para cualquier día de la semana o demandas con gran variación. A continuación en la Tabla 1, se hará un resumen de los resultados obtenidos por cada simulación, de la cual se puede concluir que el algoritmo es capaz de entregar soluciones factibles teniendo en cuenta el número máximo de personas que pueden estar trabajando o descansado para un determinado periodo.

Tabla 1: Cuadro comparativo de variación de la demanda

ALGORITMO DE GENERACIÓN DE TURNOS					
ITEM	TIPO DE TURNO	COSTO DE F.OBJETIVO	NUMERO DE CONDUCTORES	NUMERO DE TURNOS	MAXIMO CONDUCTORES DESCANSANDO
1	DEMANDA REAL	704	44	6	9
2	DISMINUCIÓN DE DEMANDA	580	38	6	11
3	INCREMENTO DE DEMANDA	800	50	6	11

Uno de los pasos del algoritmo es la búsqueda de nuevos turnos que permitan minimizar el costo de la función objetivo. Teniendo en cuenta esta característica, se ha desarrollado una simulación con un número máximo de cinco (5) iteraciones para observar el comportamiento de la asignación por periodo y buscar una disminución de costo de la función objetivo. A continuación, se puede observar en la Figura 3, el número de conductores asignados por periodo para una simulación que tiene preestablecido turnos de ocho horas con un intervalo de descanso entre la tercera y cuarta hora. Como resultado, se obtiene el cumplimiento de la demanda requerida por periodo con un total de treinta y ocho (38) conductores asignados para un día ordinario y con número máximo de nueve (9) conductores descansando en los periodos habilitados para cada turno. A partir de esta simulación, el costo de la función objetivo es de 582 generando una reducción del 18% con respecto a la solución obtenida con una sola iteración del algoritmo.

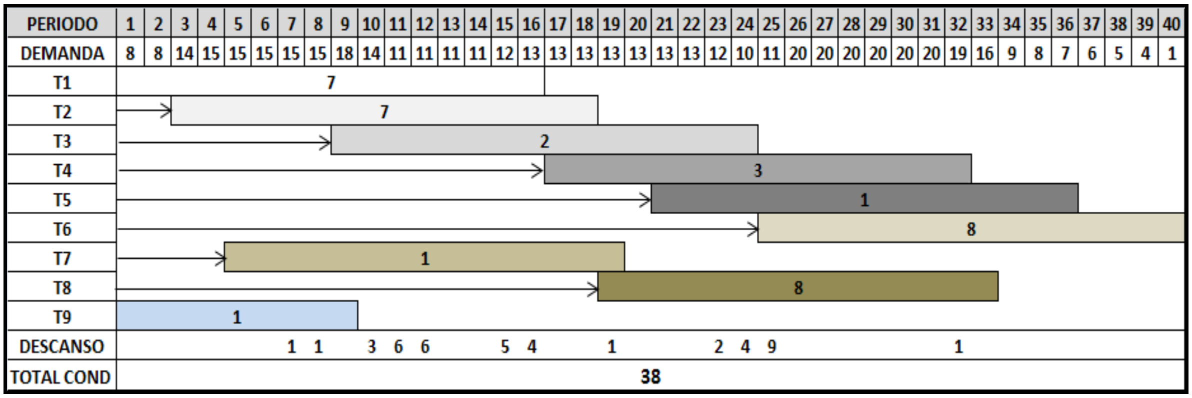

Figura 2: Programación de turno de ocho (8) horas (Iteración =5)

En la figura 4, se realiza una gráfica de comparación del número deseado de conductores en cada periodo con el resultado de la simulación del modelo matemático con una iteración igual a cinco, donde se observa la efectividad del algoritmo al asignar de manera más exacta la cantidad de conductores por periodo.

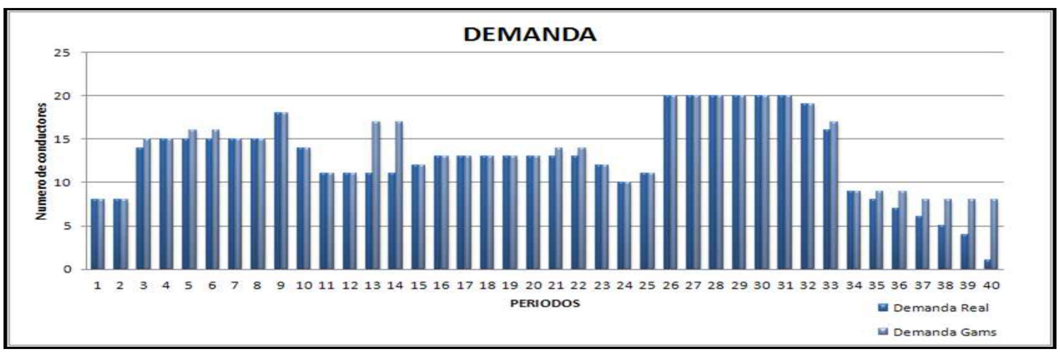

Figura 4: Resultado de Algoritmo con Iteración = 5

A partir de los resultados obtenidos en el modelo de generación de turnos y teniendo en cuenta que la solución del algoritmo con un número de cinco iteraciones concibe el mejor valor de la función objetivo, se genera una tabla (ver Tabla 2) con los datos del número de turnos generados y la cantidad de conductores por cada uno de los mismos para ser un parámetro del modelo de asignación y rotación. Con esta información, se realiza la simulación del modelo matemático en GAMS para generar la asignación y rotación con turnos de una duración de ocho horas promedio.

Tabla 2: Demanda requerida para turnos de ocho horas

DIAS	DEMANDA DE CONDUCTORES POR TURNO								
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
LUNES	7	7	2	3	1	8	1	8	1
MARTES	7	7	2	3	1	8	1	8	1
MIÉRCOLES	7	7	2	3	1	8	1	8	1
JUEVES	7	7	2	3	1	8	1	8	1
VIERNES	7	7	2	3	1	8	1	8	1
SÁBADO	6	4	2	2	1	5	1	5	1
DOMINGO	6	4	2	2	1	5	1	5	1

Al realizar la simulación del modelo de rotación y asignación de conductores, el valor obtenido de la función objetivo es de 6,9, lo cual indica que existe un incumplimiento de las restricciones en un 6,9% de las veces, esto puede suceder debido a que se necesita cumplir con la demanda exacta para un turno especifico, y en caso de no ser así no se podrá realizar el cubrimiento de todos los turnos del modelo de generación.

A continuación, se toma la información del resultado de la simulación del modelo de asignación y rotación generado por GAMS, a una tabla de Excel para a través de una macro realizar un cuadro que agrupe los conductores asignados a los diferentes turnos en un día específico. En la tabla 3, se puede observar el resultado global del modelo matemático, donde se observan los conductores que estarán en los diferentes turnos cada día de la semana.

Tabla 3: Resultado de la simulación del modelo de rotación en GAMS

ROTACIÓN	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9
L	c1, c4, c6, c9, c11, c30, c32,	c2, c12, c17, c18, c22, c23, c34,	c37, c38,	c24, c29, c36,	c28,	c3, c15, c16, c20, c21, c27, c31, c39,	c33,	c7, c10, c13, c14, c25, c26, c35, c40,	c19,
M	c1, c4, c17, c30, c34, c36, c40,	c7, c18, c23, c24, c31, c37, c39,	c10, c33,	c8, c28, c38,	c16,	c2, c5, c6, c9, c14, c21, c22, c32,	c26,	c12, c13, c19, c20, c25, c27, c29, c35,	c15,
Mi	c4, c16, c17, c26, c30, c34, c40,	c7, c10, c25, c29, c33, c36, c38,	c6, c9,	c5, c15, c24,	c2,	c1, c11, c21, c23, c28, c31, c35, c37,	c12,	c3, c13, c14, c18, c19, c22, c32, c39,	c8,
J	c4, c6, c9, c15, c30, c33, c36,	c7, c14, c18, c23, c32, c35, c37,	c21, c22,	c3, c8, c12,	c1,	c5, c10, c16, c20, c29, c31, c34, c40,	c24,	c11, c17, c19, c25, c26, c27, c28, c38,	c13,
V	c7, c9, c21, c24, c30, c32, c33,	c4, c8, c12, c28, c29, c38, c40,	c3, c15,	c17, c18, c20,	c22,	c1, c11, c14, c16, c23, c34, c36, c39,	c31,	c2, c5, c6, c13, c19, c25, c26, c37,	c27,
S	c4, c10, c19, c26, c31, c32,	c8, c20, c21, c39,	c5, c11,	c13, c30,	c27,	c1, c9, c34, c35, c40,	c16,	c2, c3, c6, c23, c36,	c25,
D	c3, c7, c15, c29, c33, c38,	c13, c14, c17, c27,	c10, c35,	c2, c25,	c28,	c5, c8, c11, c22, c24,	c19,	c12, c18, c20, c37, c39,	c26,

6. CONCLUSIONES

El modelo desarrollado permite mejorar la eficiencia de la operación para el área de planificación, debido a que se reduce el tiempo para la programación y asignación de conductores según la demanda del sistema, al tener un método organizado y confiable para la asignación y rotación de turnos con un entregable de fácil comprensión para cada conductor.

A partir de la metodología de investigación desarrollada, se logró estructurar el problema de asignación de turnos en dos fases con el objetivo de facilitar la ejecución de la investigación. La primera fase consiste en un modelo para la generación de turnos basado en generación de columnas con un algoritmo de resolución de costo *Branch*

& Price, el cual entrega como resultado el tipo de turnos a desarrollar con el número de conductores necesarios para cada uno de ellos. La segunda fase de la herramienta consiste en un modelo matemático de programación lineal con las restricciones laborales de la legislación colombiana que entrega como solución la asignación y rotación para una semana de siete días.

Como resultado de la investigación, se entrega una propuesta de reducción de costo a partir de la realización de turnos de ocho horas con una cantidad asignada de treinta y ocho (38) conductores para una semana con su respectivo sistema de horas de trabajo y descanso. Esta propuesta genera un ahorro del 18% del costo de nómina operativa y además la facilidad de tener siete (7) conductores extras para cubrir la demanda en casos de incremento súbito de la misma, vacaciones y/o incapacidades del grupo de conductores de buses articulados, y además conductores habilitados para manejar en caso de ser necesario rutas alimentadoras.

El mejoramiento en la asignación y rotación de turnos de trabajo, permitirá a los conductores desarrollar de manera más eficiente su operación diaria, evitar enfermedades profesionales por tener un horario con sus respectivos tiempos de descanso, cursos de capacitación y/o programas de profesionalización que implican un crecimiento en el desarrollo profesional y muy posiblemente mejoramiento en su ingreso salarial, así como un mayor tiempo disponible para compartir con la familia.

REFERENCIAS

Bakarcic, D., & Di Piazza, G. (2012). Ruteo de vehículos y asignación de conductores: un enfoque combinado. Tesis de Licenciatura, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.

Cappanera, A., & Gallo, G. (2004). A Multicommodity Flow Approach to the Crew Rostering Problem. *Operations Research*, Volumen 52, 583 - 596.

Ernst, A. T., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., & Sier, D. (2004). Staff Scheduling and Rostering: A review of applications, methods and models. European Joournal of Operation Research, Volumen 153, pp.3-27.

Glover, F., & McMillan, C. (1986). The General Employee Scheduling Problem: An Integration of MS and AI. Center for applied Artificial Intelligence, Compt & Ops. Res. Vol. 13, No. 5, pp. 563-578.

Kwan, A. (2000). Train driver Scheduling. Submitted in accordance with the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, School of computer Studies, University of Leeds. Leeds, UK.

Lee, Ch. (2000). The Integrated scheduling and rostering problem of train driver using Genetic algorithm. Department of Transportation and Communication Management, National Cheng Kung University. Da-Shiue Rd., Tainan, 70101Taiwan.

Nurmi, K., Kyngas, J., & Post, G.. (2011). Driver Rostering for Bus Transit Companies.Engeneering Letters, 19:2:06.

Maya, P., (2008). Algoritmo de Generación de Columnas: Una revisión desde su aplicación al problema de agrupación de cupos escolares. Departamento de Ingenieria Industrial, Universidad de Antioquia. Medellin, Colombia. No 44, pp. 145-157.

Moz, M., Respicio, A., & Pato, M., (2007). Bi-Objective Evolutionary Heuristics for Bus Drivers Rostering. Centro de Investigación Operacional, Working Paper/2007.

Pradenas, L., Hidalgo, T., & Jensen, M., (2008). Asignación de Supervisores Forestales. Resoluación Mediante un Algoritmo Tabu Search. Revista chilena de Ingeniería. Volumen 16, No. 3, pp 404 - 414.

Titiyevska, Svitlana (2006). The shift scheduling problem using a branch-and-price aproach. Mathematics barchelor tesis Vrije Universiteit Amsterdam, Amsterdam, Holanda.

Trilling, L., Guinet, A., & Le Magny, D. (2006). Nurse Scheduling Using Integer Linear Progamming and Constraint Programming . Prisma Laboratory and Hospitale of valence CHV , Lyon, France.

Xie, L., Kliewer, N., & Suhl, L. (2012) Integrated Driver Rostering Problem in Public Bus Transit. 15 Edition of the Euro Working Group of Transportation, International Scientific Conference. University of Paderborn. Paderborn, Alemania.