

MODELO DE PLANIFICACIÓN Y ASIGNACION DE PERSONAL PARA EL PATIO DE EQUIPAJES DE UN AEROPUERTO INTERNACIONAL

Juan Pablo Cavada Herrera

Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile
Beauchef 850, Santiago, Chile
jucavada@ing.uchile.cl

Cristián E. Cortés

Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile
Beauchef 850, Santiago, Chile
ccortes@ing.uchile.cl

Pablo A. Rey

Facultad de Ingeniería, Universidad Diego Portales
Av. Ejército 441, Santiago, Chile
pablo.rey@udp.cl

RESUMEN

El objetivo de este artículo es determinar el personal necesario para operar el patio de equipajes en un aeropuerto internacional que enfrenta alta demanda. Se propone la utilización de dos modelos de programación lineal entera resueltos de manera sucesiva. El primer modelo consiste en determinar la necesidad de personal utilizando información de demanda histórica y considerando las restricciones espaciales de la operación. El segundo modelo utiliza las demandas generadas y realiza una asignación diaria de tareas para los operarios, definiendo para cada uno de ellos, sus turnos de trabajo y las labores que debe realizar. Este modelo se puede clasificar como un problema de partición de conjuntos, el cual utiliza un conjunto de turnos factibles generados previamente para satisfacer las demandas. Esta herramienta fue validada en terreno con una empresa que realiza operación de equipajes en un aeropuerto, logrando mejoras importantes en sus estándares de operación.

PALABRAS CLAVE. Transporte aéreo. Programación de personal. Programación entera.

Área principal: L & T Logística y Transporte

ABSTRACT

The objective of this paper is to determine the required staff to develop ground-handling activities (baggage management) in an international airport that faces high passenger demand. We propose two linear integer programming models that are solved sequentially. The first model consists of determining the crew needs utilizing historical demand information and considering the spatial constraints of the operation. The second model utilize the generated demands and conduct a daily assignment of duties, defining for each operator, the shifts and tasks they have to perform. The model can be classified as a set partitioning problem, which utilizes a set of feasible shifts previously generated to satisfy the demand. This tool was validated on the field together with a firm that performs the ground handling tasks in an airport, obtaining important improvements in their operation standards.

KEYWORDS. Air transportation. Staff scheduling. Integer programming.

Main area: L & T Logistics and Transport

1. Introducción

En este artículo se propone un enfoque para determinar de manera eficiente el personal necesario utilizado para la carga de equipajes, en el contexto de una empresa que ofrece este servicio en un aeropuerto internacional. La empresa en cuestión debe procesar más de veinte mil maletas en un día de temporada alta, lo que es equivalente a aproximadamente 160 vuelos. El problema enfrentado consiste en planificar la cantidad de personal necesario así como la asignación de puestos de trabajos, asegurando poder cumplir con los estándares de servicio correspondientes.

La configuración del área de equipajes del aeropuerto estudiado (llamado patio de equipajes o PEQ) se puede describir como ocho carruseles hasta los cuales llegan las maletas provenientes del sector de *counters* por medio de un sistema de cintas transportadoras. El sector de *counters* está en otro piso, y corresponde al lugar común donde los pasajeros retiran sus tarjetas de embarque y entregan el equipaje. Desde los carruseles las maletas son retiradas y revisadas por operarios de la empresa, los que luego las depositan en los carros que las llevarán al avión. Además de los carruseles, en el PEQ existe un área especial donde se destinan aquellas maletas que deben pasar por niveles especiales de seguridad (llamada M9). Este esquema de operación es complejo, y la asignación de operarios a carruseles, así como la definición de sus turnos y tareas a realizar en este contexto, podrían resultar ineficientes si no se manejan apropiadamente. Estas decisiones se tornan aún más críticas cuando el sistema de itinerarios está diseñado para servir al cliente, y no orientado a la eficiencia de los operarios que trasladan el equipaje.

En este artículo presentamos un modelo de planificación de turnos y generación de tareas de operarios de carruseles en un aeropuerto internacional con alta demanda, enfatizando la metodología utilizada y algunos resultados representativos. En la siguiente sección, se desarrolla una breve descripción de la literatura en temas de asignación de turnos y tareas, en un contexto general, pero también en el ámbito de un aeropuerto internacional como el estudiado.

2. Revisión Bibliográfica

La etapa de planificación que tomaremos como base corresponde a las decisiones respecto de la asignación de tareas al personal. Uno de los enfoques más utilizados en la literatura del tema (Desrochers y Soumis, 1989; Ernst et al., 2004), consiste de dos pasos. Primero se construyen jornadas de trabajo diarias para los operarios y se determina un conjunto de estas jornadas que serán ejecutadas. Este conjunto de jornadas se selecciona de tal manera que se contemplen todas las tareas programadas para el día. Adicionalmente, se requiere que las jornadas sean compatibles con la legislación laboral y con las políticas de la empresa. Luego, asignando estas jornadas se define la carga de trabajo de cada operario para un periodo de planificación más extenso, usualmente una semana o un mes. Este segundo paso, es conocido en la literatura en inglés como *rostering* (Ernst et al., 2004). Dentro de las técnicas usadas con mayor frecuencia para resolver problemas de este tipo está la generación de columnas, utilizado en asignación de conductores a transporte público (Desrochers y Soumis, 1989; Fores et al., 1997), y en particular, es el enfoque más frecuente para los problemas de asignación de tripulaciones de aviones (Lavoie et al., 1988; Butchers et al., 2001).

Brucker et al. (2011) hace una revisión exhaustiva de modelos de asignación de personal con diferentes aplicaciones prácticas, poniendo énfasis en las formulaciones y en la complejidad de los algoritmos de solución propuestos. En el contexto de personal de aeropuerto, se puede destacar el desarrollo de modelos basados en *Goal Programming* para la asignación de turnos y tareas, así como el *rostering* del personal de aeropuerto internacional de Honk Kong, incluyendo asignación de pilotos, tripulación y personal para servicio de equipajes (Chu, 2007). Mason y Ryan (1998) muestran un modelo de simulación y optimización para el *rostering* del personal de aduanas del aeropuerto internacional de Auckland, Nueva Zelanda. Se determinan programaciones diarias, las que luego son extendidas a seis días de operación. Rodič y Baggia (2010) presentan un problema de asignación de personal en tierra en conjunto con la asignación de los equipos de trabajo, basándose en algoritmos desarrollados para un aeropuerto de Ljubljana, Eslovenia. En este trabajo se desarrolló una solución para asignación de turnos flexible, de forma de poder adaptarse a condiciones de itinerario de vuelos que podrían cambiar dinámicamente. Herbers (2005) muestra modelos y algoritmos para planificación de demanda, turnos, tareas y *rostering* para el personal en tierra de aeropuertos, basándose en diferentes técnicas (incluyendo *Branch and Price* y *Constraint Programming*) para resolver múltiples problemas de optimización que se formulan para cada etapa.

En la siguiente sección se presenta el problema de planificación de turnos del personal de patio de equipajes (PEQ), para luego plantear con el esquema de solución propuesto y la extensión al modelo de carga y generación de tareas.

3. Problema de Planificación de turnos

Uno de los recursos fundamentales en el proceso de manejo de equipajes es el personal del patio. Algunas de las labores requieren una dotación bien determinada (puestos fijos) mientras que otras, principalmente la preparación de vuelos, tienen requerimientos que dependen de la carga de trabajo del momento.

El problema que se presenta es determinar el número de operarios preparando vuelos en el PEQ a lo largo del día, indicando para cada operario la hora de entrada, de salida y cada una de las tareas que debe realizar durante su turno, asegurando que todos los vuelos sean preparados a tiempo. Para lograrlo, conocemos la forma en que llegan las maletas a carrusel y la hora de salida de cada vuelo. Esta herramienta debe además responder en un tiempo reducido para apoyar la toma de decisiones diaria de la operación.

Se desea planificar en intervalos de 24 horas, separadas en tres turnos de operación: *Apertura* desde las cuatro de la madrugada a las doce del mediodía, *Tarde* de mediodía a veinte horas y *Noche* desde las veinte a las cuatro horas del día siguiente. En la práctica, sin embargo, el paso de un turno al siguiente no es un momento definido, si no que existe una superposición entre los operarios que están entrando y los que están saliendo. De esta manera un operario puede entrar varias horas después del inicio *formal* del turno, si de esta forma se puede aprovechar mejor al personal en ciertos momentos críticos.

Antes de la aplicación de este estudio se asignaba a cada vuelo un número de operarios de acuerdo a las características de este con determinada antelación. Con este enfoque la atención del vuelo y resulta además muy cómodo para los operarios que solo deben preocuparse de un único vuelo. Sin embargo, la tasa de trabajo de un operario supera por mucho la llegada de equipajes de

un único vuelo salvo en ciertos intervalos críticos, por lo que al vincular a cada trabajador con un único vuelo pueden producirse breves periodos de mucho trabajo, alternados por largos periodos de tiempo ocioso.

En conclusión, es necesario definir un mecanismo alternativo, que permita aprovechar la capacidad de priorizar equipajes y que no requiera de un constante traslado del personal, pero que sea suficientemente flexible para disminuir los intervalos ociosos. El modelo presentado se encarga de esta situación al permitir que los operarios colaboren simultáneamente en la preparación de varios vuelos dentro del carrusel en que están asignados, pero mantiene momentos rígidos para el ingreso y salida de personal desde el puesto de trabajo, lo que permite que sea aplicable durante la operación.

4. Estructura de la solución

El enfoque propuesto consiste en dos modelos de programación lineal entera mixta, solucionados de manera secuencial, apoyados por tres módulos de manejo de información.

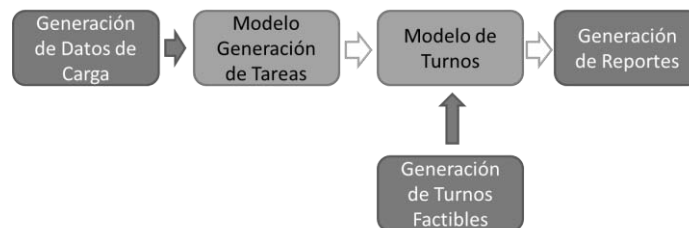


Figura 1 - Estructura de la metodología de solución propuesta.

Generación de datos de carga: este módulo toma la información de llegada de equipajes al carrusel (desde ahora demanda) y el itinerario de vuelos para el horizonte de evaluación y genera las entradas para ambos modelos.

Modelo de carga: el primer modelo de optimización determina la dotación mínima de operarios necesarios en cada momento del día que permita cumplir con la demanda de todos los vuelos.

Modelo de turnos: este modelo de optimización está basado en la generación de columnas, define la cantidad de turnos necesarios, desde un conjunto predeterminado de turnos factibles, para cubrir la dotación definida por el modelo anterior.

Generación de turnos factibles: El conjunto de todos los turnos factibles es generado de manera independiente por un algoritmo combinatorio. En esta etapa se incorporan las restricciones de tipo laboral y lógicas para determinar las tareas a realizar, las cuales no cambian en el corto plazo, por lo tanto, solo hace falta hacer la generación cuando cambian las condiciones generales.

Generación de Reportes: el último módulo corresponde a la elaboración de las salidas que son utilizadas por el planificador. En ellas se incluye el plan de trabajo diario para cada operario del PEQ, y la planificación agregada.

Los parámetros de los módulos se detallan en la Tabla 1. Algunos de estos parámetros son estimados a partir de información histórica (marcados con (e) en la tabla), mientras que los

otros corresponden a políticas de la empresa o características de la operación en el periodo que se planifica.

| Módulo | Parámetros |
|--------------------------------|--|
| Generación de datos de Carga | <ul style="list-style-type: none"> Itinerario de vuelos Factor de ocupación Factor de maletas por pasajero Hora de salida Perfil de llegada de maletas a carrusel (e) |
| Modelo de Carga | <ul style="list-style-type: none"> Tasa de trabajo de un operario [maletas/min] (e) Fracción de maletas desviadas a M9 (e) |
| Generación de Turnos Factibles | <ul style="list-style-type: none"> Posibles horas de inicio de turnos Número de puestos de trabajo. |

Tabla 1 - Parámetros modelos

Como se mencionó anteriormente existe una superposición entre turnos al momento del cambio se debe planificar en un esquema de horizonte rodante, por lo tanto las condiciones de borde, estado inicial y final del sistema, tendrán un gran impacto en la solución; pues afectarán más allá del turno inicial. Para disminuir este efecto se propone extender el horizonte de planificación al menos 16 horas (dos turnos) antes y después del momento que se desea estimar.

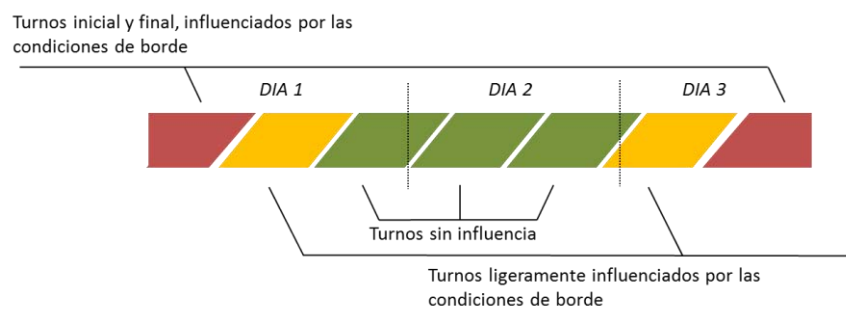


Figura 2 - Esquema de la influencia de las condiciones de borde

Esta solución separa la planificación de distintos días, al costo de aumentar el tamaño del problema, teniendo que considerar ahora 56 horas en total. En la solución implementada se consideró como momento inicial las 6:00 del día anterior al deseado y como condición final, se establece que el último vuelo sale a las 12:00 del día siguiente.

A continuación se describen los dos modelos de programación lineal utilizados.

5. Modelo de Carga o Generación de Tareas

5.1. Descripción

El primer modelo busca determinar para cada periodo la cantidad mínima de operarios necesarios para enfrentar la demanda de equipajes llegando a carrusel. Una característica de este modelo es que cuando llega una maleta al carrusel, no se está forzado a procesarla inmediatamente, sino que el operario puede posponerla para un periodo posterior, decidiendo en cada periodo que vuelo va atender. De esta manera se va formando un inventario de maletas por procesar para cada vuelo en el carrusel. Se exige que todas las maletas de cada vuelo sean procesadas antes del momento de cierre de este. Se restringe el modelo a que solo sea posible cambiar la cantidad de operarios de un carrusel en determinados periodos (por ejemplo solo cada media hora). Se estudiaron otras alternativas del modelo presentado con mayor libertad de

asignación, pero resultaron muy complejos de resolver computacionalmente o entregan soluciones con muchos cambios en periodos cortos.

5.2. Formulación

El modelo lineal entero mixto propuesto se muestra a continuación. Primero se introducirán los conjuntos de índices necesarios;

a) Conjuntos

C : carruseles

V : vuelos

T : periodos

$\tilde{T} \subseteq T$: periodos en los que es posible cambiar la cantidad de operadores

El tiempo fue discretizado en periodos de 5 minutos de duración. Una discretización más fina puede conducir a un modelo que requiera demasiados recursos. No es posible utilizar intervalos de mayor largo, porque cinco minutos es el tiempo mínimo de salida entre dos vuelos.

Dado existe la posibilidad que en un mismo carrusel no todos los vuelos sean procesados por la misma compañía, es necesario separar aquellos que podemos planificar de los demás.

$VC \subseteq V$: vuelos pertenecientes a la compañía

$VO \subseteq V$: vuelos de otras compañías

b) Parámetros.

d_{tv} : maletas que llegan del vuelo v en el periodo t al carrusel.

\tilde{d}_{tv} : maletas que llegan del vuelo v en el periodo t a M9.

λ : tiempo que demora en procesar una maleta un operario.

M_c : máximo de maletas permitido en un carrusel c .

MO : máximo de operarios que pueden trabajar simultáneamente en un carrusel.

n : variación máxima de operarios en un carrusel.

$a_{tv} : \begin{cases} 1 & \text{si el vuelo } v \text{ puede ser preparado en el periodo } t. \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$

$Carr_{cv} : \begin{cases} 1 & \text{si el vuelo } v \text{ es preparado en el carrusel } c. \\ 0 & \text{en caso contrario.} \end{cases}$

OP_{tv} : Numero de operarios de otras compañías preparando el vuelo v

Los parámetros d_{tv} , \tilde{d}_{tv} y λ pueden ser estimados en base a información histórica. El máximo de operarios y de maletas en carrusel están dados por el espacio físico disponible para el trabajo de los operarios y el estacionamiento de los carros. Finalmente, los parámetros a_{tv} y $Carr_{tv}$ se construyen directamente del itinerarios de vuelos esperado para el periodo.

Cabe mencionar que a pesar que el carrusel M9, podría considerarse igual a los demás carruseles para casi todos los efectos; sin embargo, se debe controlar el flujo de salida de maletas en forma independiente.

c) **Variables.**

- $X_{tc} \in \mathbb{Z}^+$: cantidad de operarios en el carrusel c durante el periodo t .
 $f_{tv} \in \mathbb{R}^+$: maletas procesadas del vuelo t durante el periodo t en carruseles.
 $\tilde{f}_t \in \mathbb{R}^+$: maletas procesadas durante el periodo t en M9.
 $I_{tv} \in \mathbb{Z}^+$: inventario de maletas en el carrusel del vuelo v durante el periodo t .
 $IC_{tc} \in \mathbb{R}^+$: inventarios de maletas en el carrusel c durante el periodo t .
 $S_{tc} \in \mathbb{Z}^+$: operarios que empiezan a trabajar en el carrusel c durante el periodo t .
 $B_{tc} \in \mathbb{Z}^+$: operarios que terminan de trabajar en el carrusel c durante el periodo t .

La principal variable de decisión corresponde a X_{tc} , el número de operarios a utilizar para cada periodo en cada carrusel. Se tienen además otros tres tipos de variables: para manejar el flujo de equipaje sacado en cada periodo se utiliza f_{tv} , nótese que a esta variable no se le exige integralidad, análogamente se utiliza \tilde{f}_{tv} para la atención en el carrusel M9. Se utilizan I_{tv} e IC_{tc} para contar la cantidad de maletas pendientes a procesar en cada periodo por vuelo y por carrusel respectivamente. En estricto rigor, la segunda variable no es necesaria, sino que queda definida por la ecuación (1), sin embargo se utiliza para dar mayor claridad a la formulación. Por último, se utilizan S_{tc} y B_{tc} para ejercer control sobre el tamaño de la variación de operarios en cada periodo.

d) **Modelo:** El modelo de generación de tareas se define a continuación.

$$\min \alpha \sum_t \sum_v a_{tv} X_{tv} + (1 - \alpha) \sum_t \sum_c IC_{tc}$$

s.a.

$$IC_{tc} = \sum_c Carr_{cv} I_{tv} \quad \forall t, \quad \forall c \quad (1)$$

$$IC_{tc} \leq M_c \quad \forall t, \quad \forall c \quad (2)$$

$$I_{tv} = d_{(t-1)v} + I_{(t-1)v} - a_{tv} f_{(t-1)v} \quad \forall t > 1, \forall v \quad (3)$$

$$IC_{tc} = \sum_{v \in VC} \tilde{d}_{(t-1)v} + IC_{(t-1)c} - a_{tv} \tilde{f}_{(t-1)} \quad \forall t > 1 \quad c = M9 \quad (4)$$

$$I_{Tv} = 0 \quad \forall v \quad (5)$$

$$\lambda X_{tc} \geq \sum_{v \in VC} Carr_{cv} f_{tv} \quad \forall t, \quad \forall c \neq M9 \quad (6)$$

$$\lambda X_{tc} \geq \tilde{f}_t \quad \forall t, \quad c = M9 \quad (7)$$

$$\lambda OP_{tv} \geq f_{tv} \quad \forall t, v \in VO \quad (8)$$

$$X_{tc} = X_{(t-1)c} + S_{tc} - B_{tc} \quad \forall t > 1, c \quad (9)$$

$$X_{tc} + OP_{tc} = MaxOP \quad \forall t, c \quad (10)$$

$$S_{tc} \leq \begin{cases} n & \text{si } t \in \tilde{T} \\ 0 & \text{si } t \notin \tilde{T} \end{cases} \quad \forall t, c \quad (11)$$

$$B_{tc} \leq \begin{cases} n & \text{si } t \in \tilde{T} \\ 0 & \text{si } t \notin \tilde{T} \end{cases} \quad \forall t, c \quad (12)$$

La función objetivo minimiza un compromiso entre personal y la cantidad de maletas en cada periodo en el carrusel, pues se ha encontrado en estudios anteriores que los errores de operación aumentan con la saturación del carrusel. El parámetro α permite cambiar la importancia de ambos objetivos, en la implementación se consideró un $\alpha = 0,9$.

Las restricciones (1) y (2) definen la cantidad de maletas totales del carrusel y evitan que se supere la capacidad del mismo. Usando (3) se controla el inventario de maletas pendientes de cada vuelo, igualando el inventario con la llegada, el inventario del periodo anterior y restando las maletas atendidas. Para el caso de M9, la ecuación (4) en lugar de llevar la cuenta por vuelo, se lleva directamente en forma agregada para el carrusel. La condición (5) asegura que no puedan quedar maletas sin procesar al momento de partida del vuelo.

La capacidad de procesar maletas en un carrusel se define en (6) para la compañía, en (7) para para el carrusel M9 y en (8) para los otros operadores, donde el flujo de salida total de cada caso está acotado por los operarios asignados a cada carrusel y la tasa de atención.

La entrada y salida de los operarios a cada carrusel se modela utilizando (9), donde básicamente se controla la variación de X_{tc} entre dos periodos consecutivos, el máximo de operarios posible para cada carrusel queda definido por (10). Para asegurar que solamente ingresen o salgan operarios en momentos permitidos y para definir el tamaño máximo de cada variación se utilizan las desigualdades (11) y (12).

6. Modelo de Asignación de Turnos

6.1. Descripción

El objetivo de este modelo es determinar la combinación de operarios de menor costo, que permita cumplir con todas las tareas generadas en el modelo anterior y al mismo tiempo definir para cada operario los detalles de su turno. En particular: la hora de inicio y fin de su jornada, el momento en que se producirá el descanso y cada una de las tareas (y el momento) que debe realizar durante su turno.

Se deben considerar diferentes tipos de condiciones que se debe satisfacer un turno para ser factible de aplicar o no: se tienen restricciones contractuales como la duración de la jornada o el momento y largo del descanso; y restricciones operativas como el tiempo mínimo que un operario debe permanecer en un determinado puesto de trabajo y la cantidad de trabajos distintos que puede realizar durante su jornada, entre otros.

6.2. Formulación

El modelo corresponde a un problema de partición de conjuntos, donde se dispone de un conjunto I de *turnos factibles* que deben ser usados para cubrir los requerimientos en C puestos de trabajo (carruseles) durante toda la jornada. Este conjunto es generado previo a la resolución del modelo mediante el algoritmo descrito en la sección 6.3.

a) Conjuntos.

- $i \in I$: conjunto de turnos factibles
- $j \in J$: lugares de trabajo (carruseles)
- $t \in T$: bloques de media hora

b) Parámetros.

- R_{jt} : requerimiento de personal en el puesto de trabajo j durante el bloque t
- $a_{ijt} : \begin{cases} 1 & \text{si el turno } i \text{ cubre el trabajo } j \text{ durante el periodo } t \\ 0 & \text{en el caso contrario} \end{cases}$
- c_i : penalidad de usar el turno tipo i

El parámetro R_{jt} corresponde al resultado del modelo de Generación de Carga. El parámetro a_{ijt} que indica si un turno cubre una tarea, al igual que el costo de cada turno, se obtienen directamente del algoritmo de generación de turnos factibles.

c) Variables.

- $x_i \in \mathbb{Z}^+$: cantidad de turnos tipo i utilizados.

d) Modelo.

$$\min \sum_i c_i x_i$$

$$\sum_i a_{ijt} x_i \geq R_{jt} \quad \forall j \in J, \quad t \in T$$

La función objetivo consiste en encontrar la combinación de turnos de menor costo posible, lo cual es equivalente a minimizar la cantidad de operarios en el patio, los costos están allí para asegurar que se escojan los turnos con menor cantidad de tareas distintas. La única restricción del modelo asegura que se cumpla con la demanda de personal definida.

La penalidad asociada a cada turno es utilizada para dar preferencia a ciertos esquemas de turnos. Esta decisión depende del objetivo del planificador y de las políticas de la empresa. Se utilizó como regla que **un turno es mejor mientras menos tareas distintas posea**, de esta forma se están privilegiando aquellos turnos más sencillos para el operario. Específicamente, la penalidad asociada a un turno se define como un valor fijo más el número de cambios de tareas dentro del turno. De esta manera al buscar la combinación de turnos de menor costo, se induce la selección de aquellos turnos preferidos, pero respetando la condición que un turno malo es preferible a agregar un operario adicional.

6.3. Algoritmo de Generación de Turnos Factibles

Se define un turno factible como una combinación de tareas que es posible de realizar por un operario durante su jornada. El conjunto de turnos factibles se mantiene constante en la mayoría de los casos, por lo tanto la generación debe realizarse una única vez, a menos que

cambien las condiciones generales de operación. La Figura 3 muestra ejemplos de diferentes turnos factibles.

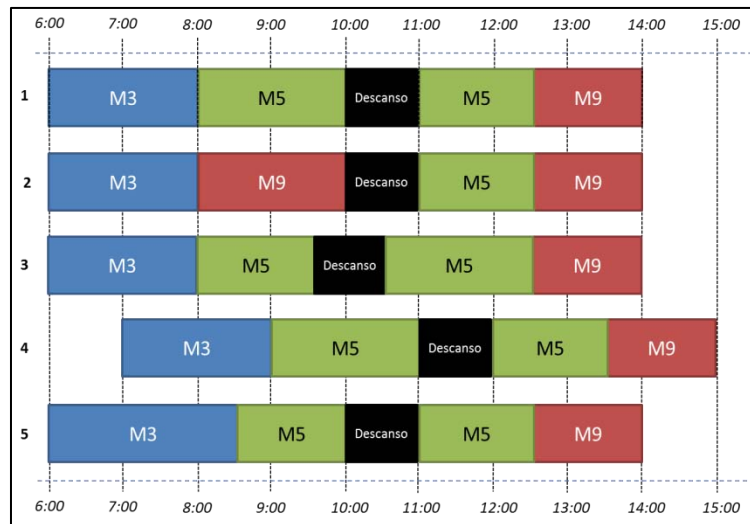


Figura 3 - Ejemplos de diferentes turnos factibles

En el ejemplo, un operario o turno tipo 1, comenzaría a trabajar a las 6:00 en el carrusel M3, dos horas más tarde pasaría al carrusel M5, tomaría su descanso a entre las diez y las once para luego continuar trabajando en el mismo carrusel y finalizaría su jornada en M9. Cualquier combinación distinta a la anterior se consideraría un nuevo turno factible, por ejemplo: algún trabajo distinto (2), un horario de descanso distinto (3), cambios en el horario de ingreso/salida (4) o cambios en la duración de las tareas (5).

Las consideraciones tomadas para asegurar que los turnos creados sean operativa y laboralmente viables se definen mediante las siguientes reglas de generación de turnos:

- Un turno dura siempre 8 horas y se divide en bloques de media hora.
- Las tareas tienen una duración posible de una hora y media, dos, tres, tres y media o cuatro horas.
- El descanso es una tarea especial que tiene una duración de una hora (2 bloques), que no puede comenzar antes del 7° bloque ni después del 9°, es decir, no comienza el descanso antes de haber trabajado tres horas ni se demora pasado la quinta hora.
- Los horarios de inicio de turno están acotado a los determinados tramos horarios.
- Un operario puede realizar a lo más dos tareas diferentes antes del descanso y dos después del descanso. Así, el máximo de tareas distintas a realizar durante un turno es cuatro.

Como se mencionó anteriormente, se generan previamente todas las combinaciones de tareas que son posibles. Para una instancia real de operación se enumeran del orden de un millón de turnos factibles. El algoritmo utilizado en la generación considera solamente dos posibles duraciones para las tareas: hora y media (3 bloques) y dos horas (cuatro bloques), de esta forma por ejemplo, una tarea de 3 horas corresponde a dos de hora y media iguales. De esta manera se tienen seis estructuras de turnos posibles:

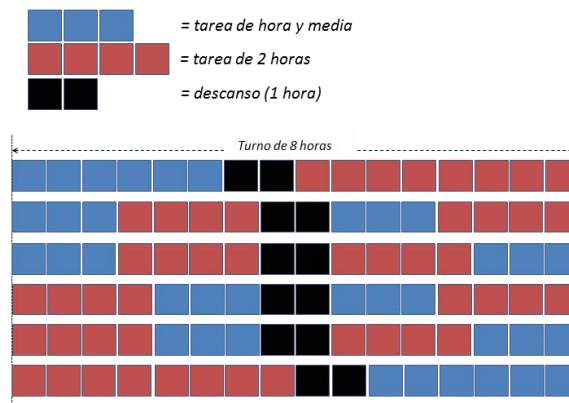


Figura 4 - Estructuras de turnos posibles

Bajo estas condiciones, y considerando el horizonte de planificación de 56 horas, se obtiene del orden de un millón de turnos factibles posibles, una cantidad de variables perfectamente manejable para cualquier herramienta de optimización moderna. En particular, la cantidad de turnos factibles generados (contando los duplicados) está dada por la siguiente fórmula:

$$\text{Turnos Generados} = 6 * \text{Tareas}^4 * \text{Inicios}$$

donde el factor “Inicios” corresponde a la cantidad de horarios en que es posible iniciar un turno. Considerando las ventanas de inicio presentadas anteriormente tenemos, la Tabla 5 muestra para distintos números de tareas, la cantidad de turnos generados y el tiempo de generación. Una vez generados todos los turnos, se eliminan los duplicados y aquellos casos poco atractivos en la práctica, como por ejemplo un turno con dos tareas consecutivas ubicadas en extremos opuestos del patio de equipajes.

| Tareas | Variables Generadas | Eliminadas | Utilizadas | Tiempo (s) |
|--------|---------------------|------------|------------|------------|
| 7 | 374556 | 34398 | 340158 | 38 |
| 8 | 638976 | 51584 | 587392 | 64 |
| 9 | 1023516 | 73710 | 949806 | 157 |
| 10 | 1560000 | 101400 | 1458600 | 397 |

Tabla 2 - Turnos generados dependiendo del número de tareas.

7. Experimentos computacionales

La implementación computacional fue realizada en C++ para la programación y el modelamiento realizado en GAMS v23.7 y resuelta utilizando CPLEX. El tiempo total de ejecución es de aproximadamente 6 minutos y 30 segundos para una instancia real.

Las soluciones producidas con el modelo fueron implementadas en terreno durante el periodo de Diciembre 2011 a Marzo 2012, logrando una disminución del personal necesario de acuerdo a lo planificado. Sin embargo, el mayor beneficio se ve en la cantidad promedio de maletas esperando por ser procesadas en carruseles que disminuyó. En conclusión, el modelo

efectivamente es capaz de generar una asignación mucho más eficiente que la asignación manual utilizada previamente por la empresa.

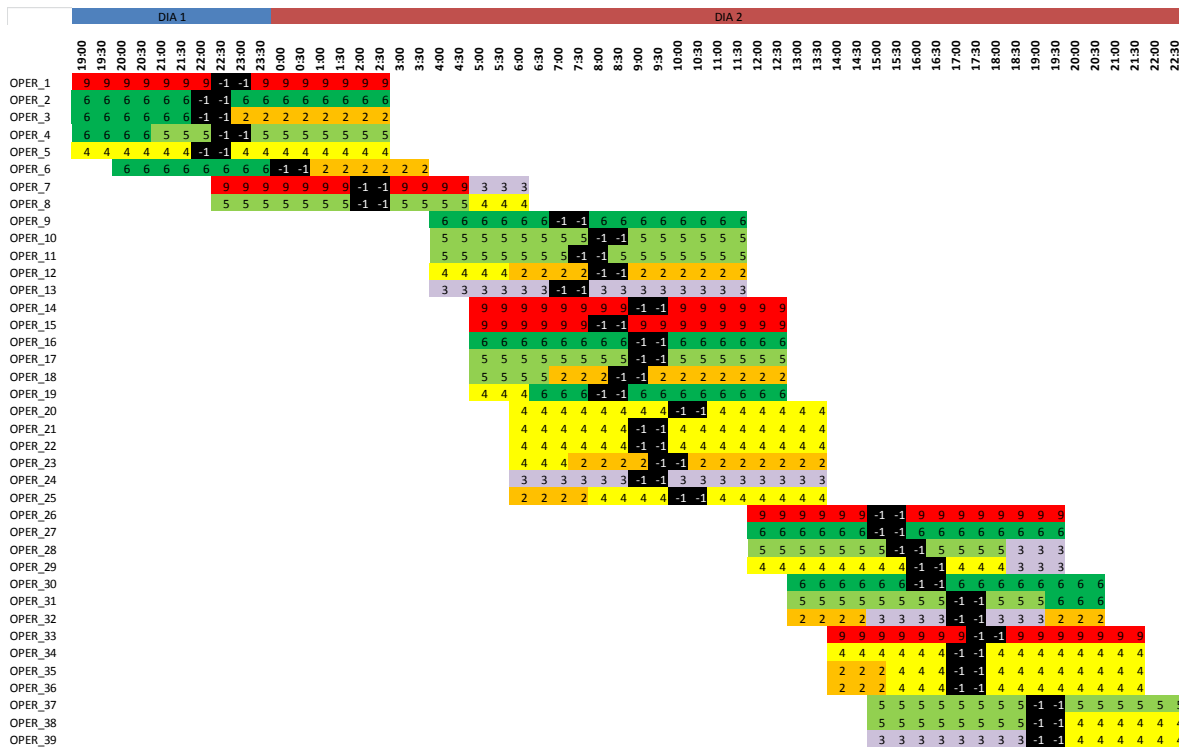


Figura 5 - Ejemplo planificación diaria para un día de Febrero 2012

En la Figura 6 se muestra una salida de la herramienta con el detalle de la planificación de un día de Febrero para todos los operarios del patio. Los números indican el carrusel en que debe trabajar y los periodos de descanso están marcados por en negro.

8. Conclusiones

Se presenta un esquema basado en dos modelos de programación entera del personal de patio de equipajes. Los modelos incorporan todas las condiciones operativas y políticas de la empresa y son capaces en pocos minutos de generar una asignación del personal.

Las asignaciones obtenidas con la metodología propuesta fueron evaluadas en un piloto conducido durante la temporada estival 2011-2012. Los resultados obtenidos muestran mejoras similares a los estimados en los análisis previos, siendo el mayor beneficio un trabajo más ordenado del patio con la reducción del número de maletas que están en el carrusel.

Extensiones de este trabajo, que se encuentran actualmente en desarrollo, comprenden la inclusión de otras actividades como manejo de tractores y carga de aviones además de la manipulación de equipajes en carrusel, así como la adaptación de la metodología para su uso como herramienta de apoyo para la reasignación de personal en caso de contingencias en la operación.

Agradecimientos

Esta investigación fue parcialmente financiada por Fondecyt (proyecto 1100239) y el Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ICM P-05-004-F, CONICYT FBO16).

Referencias

Brucker, P., Qu, R., Burke, E. (2011). Personnel scheduling: Models and complexity, *European Journal of Operational Research* Vol. 210, 467–473.

Butchers, E., Day, P., Goldie A., Miller, S., Meyer, J., Ryan D., Scott, A. y Wallace, C. (2001). Optimized crew scheduling at Air New Zealand, *Interfaces* January/February 2001 Vol. 31, No. 1, 30-56.

Chu, S. (2007). Generating, scheduling and rostering of shift crew-duties: Applications at the Hong Kong International Airport, *European Journal of Operational Research* Vol. 177, 1746-1778.

Desrochers, M. y Soumis, F. (1989). A column generation approach to the urban transit crew scheduling problem, *Transportation Science* Vol. 23, No. 1.

Ernst, A.T., Jiang, H., Krishnamoorthy, M. y Sier, D. (2004). Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models, *European Journal of Operational Research* Vol. 153, 3-27.

Forbes, M., Holt, J. y Watts, A. (1994). An exact algorithm for multiple depot bus scheduling, *European Journal of Operational Research* Vol. 72, 115-124.

Lavoie, S., Minoux, M. y Odier, E. (1988). A new approach for crew pairing problems by column generation with an application to air transportation, *European Journal of Operational Research* Vol. 35, No 1, 45–58.

Mason, A., Ryan M. y Panton, D. (1998) Integrated simulation, heuristic and optimization approaches to staff scheduling. *Operations Research* Vol. 46, No. 2, 161-175.

Rodič B., Baggia, A. (2010). Dynamic Airport Ground Scheduling, *Proceedings of the 21st Central European Conference on Information and Intelligent Systems*, 445-455.

Herbers, J. Models and Algorithms for Ground Staff Scheduling on Airports. *Tesis de doctorado*, Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2005.