
MODELO DE SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS EN PATIO DE EQUIPAJES EN UN AEROPUERTO DE ALTA DEMANDA

JUAN PABLO CAVADA ^{*}
CRISTIÁN E. CORTÉS ^{**}
RICARDO GOEPPINGER ^{**}
PABLO A. REY ^{***}

Resumen

El manejo de equipajes es parte relevante dentro de las actividades en tierra ligadas a los vuelos en un aeropuerto y muestra directa relación con la percepción de calidad de servicio de una compañía aérea. Actualmente, los grandes aeropuertos operan con sistemas de manejo de equipaje automatizados. El Aeropuerto de Santiago dispone de un sistema bastante avanzado pero aún parte de sus operaciones se realizan de manualmente, lo que produce una menor calidad de servicio y problemas en la gestión del aeropuerto. En este trabajo se presenta un modelo de simulación de la operación del terminal, desde la llegada de pasajeros a los *counters* hasta la carga de equipajes en los aviones. El modelo de simulación se implementó con el paquete de microsimulación de tráfico PARAMICS. Para realizar esta implementación se debió adaptar la lógica del funcionamiento del sistema de manejo de equipajes a la lógica de los flujos vehiculares asociados al tráfico urbano. Con el apoyo del simulador construido se han identificado los cuellos de botella del sistema, las causas de las detenciones del sistema de cintas transportadoras y la sobrecarga de trabajo en ciertos sectores en determinados periodos del día. A partir de estos resultados, se proponen alternativas de mejora para los problemas detectados. Además, el simulador permite estimar el rendimiento de configuraciones hipotéticas diferentes de la operación actual.

PALABRAS CLAVE: Simulación, Equipajes, Logística en Aeropuertos.

^{*}Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile, Santiago, Chile.

^{**}Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile, Santiago, Chile.

^{***}Facultad de Ingeniería, Universidad Diego Portales, Santiago, Chile.

1. Introducción

El manejo de equipajes es un proceso relevante para las actividades en tierra asociadas a los vuelos que operan en los aeropuertos, tanto para usuarios como para operadores. Lo anterior debido a que una buena imagen de las empresas de transporte aéreo se ve muy afectada si los equipajes no llegan a destino, o bien sufren daños durante los viajes. Este tipo de operaciones se complica mucho en los principales aeropuertos de las ciudades importantes del mundo, donde la cantidad de vuelos que deben procesarse en forma simultánea genera una alta actividad e intensidad de pasajeros, lo cual hace que estas operaciones se vuelvan extremadamente complejas.

En la actualidad, los mayores aeropuertos del mundo operan con sistemas de manejo de equipaje automatizados (BHS, del inglés *baggage handling system*). En el Aeropuerto Internacional de Santiago se cuenta con un BHS bastante avanzado, pero que no es completamente automático. En este caso, la empresa a cargo de la mayoría de estas operaciones (Andes Airport Services) realiza la mayor parte de sus procesos de manera principalmente manual. Así, operaciones de separación y distribución de equipajes en distintos vuelos de la misma compañía se realiza sin incorporar toda la tecnología necesaria para tener un control y manejo eficiente de las labores del patio de equipajes (en adelante PEQ) así como un ordenamiento adecuado para enfrentar situaciones de estrés, las cuales se han hecho bastante recurrentes en el último tiempo debido a un explosivo aumento tanto de la demanda como de la oferta de vuelos, situación que no ha estado alineada con un aumento y mejora de las instalaciones del aeropuerto para facilitar estas tareas.

De hecho, durante los meses de Enero y Febrero de 2011, el Aeropuerto Internacional de Santiago enfrentó la demanda record histórica. Solamente durante Febrero 1.077.193 pasajeros pasaron por el terminal, lo que representa un aumento cercano al 25 % con respecto al mismo periodo del año 2010. Durante el año 2010 se transportaron un total de 10 millones de pasajeros, constituyendo un alza del 14,3 % con respecto al año 2009. En los meses que van del año 2012, la demanda se sigue incrementando considerablemente, mostrando una tendencia preocupante e inmanejable si no se toman medidas radicales en cuanto a los protocolos de operación en el corto plazo. La capacidad del aeropuerto AMB fue ampliada en el año 2001 y está estimada en 9,5 millones de pasajeros por año. Bajo este escenario, todos los sistemas que operan el terminal están sometidos a un nivel de estrés sin precedentes. Como consecuencia

se producen largas esperas para los pasajeros, retrasos en los vuelos y posibles pérdidas (daños) de equipajes en el proceso de manipulación desde su llegada al sector de *counters* hasta que son subidos a los aviones.

Todo lo anterior representa una motivación especial para estudiar y proponer mejoras de corto y mediano plazo para mejorar la operación optimizando las operaciones, procesos y el uso de los recursos disponibles con el fin de soportar este aumento en la intensidad de la demanda, bajo un escenario (infraestructura disponible) que no se espera que cambie al menos en los próximos dos años. El tipo de medidas que deben ser consideradas van desde mejorar los indicadores de rendimiento hasta poder cuantificar las dotaciones necesarias de personal, mejorar en una primera instancia los procesos en la operación, para finalmente rediseñar los protocolos y proponer medidas concretas de mejoramiento en los plazos requeridos. Notar que una adecuada operación logística del sistema y manejo de equipajes permite optimizar los recursos disponibles, aprovechando al máximo la capacidad instalada en una primera etapa, y proponiendo mejoras razonables en la línea de potenciales aumentos de capacidad en el mediano y largo plazo.

En este artículo se presenta una primera etapa de mejoramiento que contemple la implementación de un simulador de todos los procesos que involucran el traslado de las maletas desde el sector de *counters* hasta el carro que finalmente las lleva al avión. Del resultado de las simulaciones será posible analizar en profundidad el BHS para el área de embarques nacionales e internacionales, identificando los cuellos de botella en la operación, así como los procesos críticos y su impacto en el resto del sistema. La métrica fundamental utilizada para cuantificar el rendimiento del sistema es el número de maletas que quedan en tierra, es decir maletas que a pesar de ser ingresadas en *counters*, no logran acceder al avión.

En la simulación se ha capturado la relación entre todos los componentes que afectan el equipaje de aquellos pasajeros que embarcan. Se ha modelado la ruta completa que siguen las maletas a través del sistema, considerando desde el momento en que los pasajeros ingresan al terminal y se ponen en cola, el *check-in* e ingreso de sus maletas al sistema, el tránsito por las cintas transportadoras desde el sector de *counters*, el paso de éstas por los sistemas de seguridad a través de los escáners localizados en lugares estratégicos, hasta la llegada a los carruseles del patio de equipaje donde son cargadas en carros y despachadas a los correspondientes aviones. Debe mencionarse que Andes Airport Services maneja el 85 % del equipaje del aeropuerto, lo que corresponde a más de 18 mil maletas diarias en embarques en los periodos del año con mayor demanda (meses de verano principalmente).

Existe abundante literatura en temas de simulación del *check-in* en aero-

puertos. En [6] se analiza con profundidad las principales ventajas de estudiar este tipo de sistemas utilizando simulación pura o en combinación con otras herramientas, tales como teoría de colas u optimización lineal. En [3] entregan argumentos a favor de utilizar simulación para modelar los procesos de *check-in* de pasajeros en los aeropuertos y se apoya con un estudio de caso correspondiente al aeropuerto de Amsterdam. Las colas en los aeropuertos se explican como función de fuertes fluctuaciones y *peaks* durante el día en la cantidad de pasajeros que llegan. La teoría de colas es incapaz de explicar esta variabilidad y por lo tanto no es apropiada para calcular la cantidad de *counters* requeridos. Una aproximación alternativa se encuentra en [2], donde mediante el uso de simulación se estiman tiempos de espera para pasajeros en función de la cantidad de *counters* disponibles para cada vuelo en forma dinámica a lo largo del día. En [5] se explica en detalle el modelo necesario para optimizar la asignación de *counters* basándose en el patrón de llegada de pasajeros.

En cuanto al modelamiento de sistemas de equipajes, existen trabajos a nivel macroscópico, como [1, 4]. En ambos trabajos el BHS es parte de un simulador que representa todos los procesos relacionados en el terminal, donde cada proceso es un módulo, lo que resulta muy útil a la hora de evaluar el desempeño global del terminal. Por otro lado existen simulaciones del BHS, también detalladas en [1], pero con modelos construidos *ad hoc* para aeropuertos específicos, por lo que su extensión a casos generales no directa.

Observando globalmente la literatura en relación con el modelamiento de BHS, notamos que los trabajos son ya sea muy desagregados (micro) o bien muy agregados (macro), lo que dificulta capturar las relaciones existentes entre la llegada de pasajeros al terminal, el ingreso al sector de *check-in* y el trabajo de los operarios que cargan las maletas al avión al final de la cadena. La simulación propuesta en este trabajo está estructurada y construida sobre un microsimulador de tráfico urbano, que se ha adaptado vía API para emular el movimiento de las maletas sobre una red de correas transportadoras con prioridad. Esta construcción nos permitió estudiar de mejor forma la relación entre los procesos mencionados anteriormente.

En la siguiente sección, se entrega una breve descripción del funcionamiento del patio de equipajes BHS, para el caso de los embarques, notando que el presente estudio se ha centrado en el movimiento de maletas desde los *counters* hasta los aviones que salen del aeropuerto, no incluyendo por el momento la operación para recuperar las maletas de los vuelos que llegan, proceso que debería ser bastante más sencillo de enfrentar. En la sección 3 se describe en forma detallada como ha sido estructurado el simulador, mientras que en la sección 4 se presentan los resultados que se obtienen del simulador. La sección 5 cierra este artículo con conclusiones del trabajo, el estado actual del desarrollo

y las tareas futuras.

2. El Sistema BHS de Embarques

Con el objeto de entender las componentes y lógica de funcionamiento del simulador construido, en primer lugar es importante describir en detalle el sistema de manejo de equipajes del Aeropuerto Internacional de Santiago. El BHS en su forma más pura está constituido por el conjunto de cintas transportadoras, puertas y carruseles que se utilizan para llevar las maletas de los pasajeros desde el punto de entrega en *counters* hasta los contenedores que se ingresan al avión. En la definición del BHS incluiremos todos los sistemas anexos al manejo de equipajes que de alguna forma se relacionan con su funcionamiento, desde la llegada del pasajero al aeropuerto hasta el momento del carguío en la aeronave.

Se revisan primero los componentes principales del BHS (Figura 1) y luego se realiza una descripción del recorrido de los procesos involucrados. El aeropuerto bajo estudio posee 104 mesones para el registro de pasajeros (*counters*), los cuales se encuentran agrupados en cuatro subsistemas (T1, T2, T3 y T4). Los 28 *counters* de cada "T" (20 en el caso de la T4) están conectados a una cinta común llamada colector, el ingreso de los equipajes desde el mesón al colector es automático. Cada colector termina en una profunda bajada hasta el patio de equipajes, al final de la cual se localiza un escáner de seguridad conocido como N2 (nivel de seguridad 2).

En el primer piso del aeropuerto se encuentra el patio de equipajes (que ya hemos denotado PEQ), lugar en el que se manejan todos los equipajes que llegan o salen del terminal. Cada uno de los subsistemas "T" desemboca en dos carruseles donde los equipajes son segregados y cargados en los carros para ser trasladados finalmente a sus aviones. En total existen ocho carruseles: M1 y M2 asociados a la T1, M3 y M4 a la T2, desde la T3 se descarga a los carruseles M5 y M6, y finalmente las maletas de la T4 llegan hasta los carruseles M7 y M8. En forma transversal a todo el patio existe la cinta L3, que puede recoger equipajes de todas las "T" y los lleva a otro subsistema T5. En el subsistema T5 se procesan todos los equipajes que presentan algún tipo de inconveniente, ya sea porque el sistema de dirección ha perdido su identificación (conocido como error de rastreo) o porque ha sido marcado como "sospechoso" por el escáner N2. La T5 está formada por un escáner de mayor potencia (conocido como N3 o nivel 3), un sector cerrado de alta seguridad para los casos especiales y un carrusel donde terminan los equipajes liberados llamado M9.

Además de las cuatro “T” hay otras dos bajadas de equipajes, cuales son la cinta para equipajes sobredimensionados y la cinta para los *counters* de pasajeros preferenciales. Estas dos cintas poseen su propio escáner de seguridad N2. Aunque en este estudio el foco está en los equipajes de salidas, por completitud cabe mencionar que existen en el patio nueve cintas para arribos, numeradas de R1 a R9.

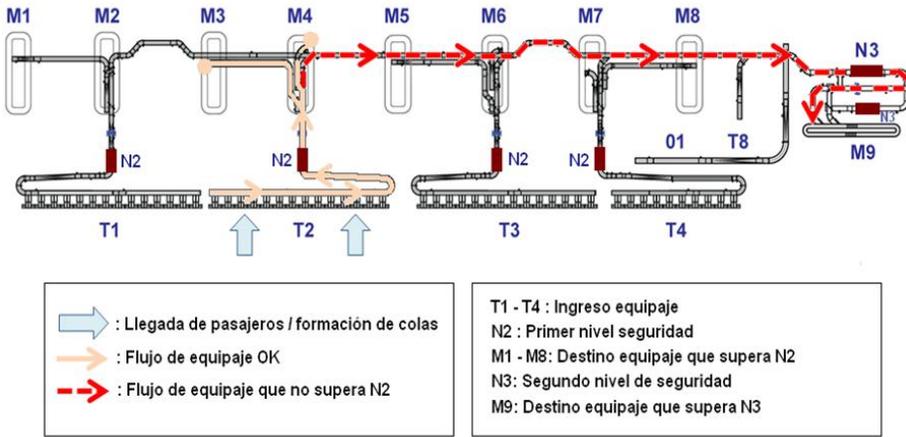


Figura 1: Plano esquemático del BHS del aeropuerto Internacional de Santiago

Habiendo revisado los elementos más importantes de sistema BHS, se describirá a continuación el recorrido de un equipaje por el sistema, desde el momento del ingreso del pasajero al edificio del terminal hasta que es colocado en el carro o contenedor correspondiente al vuelo asociado.

Sector Counters (tercer piso) Los pasajeros ingresan al terminal por el tercer piso del edificio, desde ahí acceden a la cola correspondiente a su vuelo. Cada fila está asociada a un conjunto de *counters*. Se denota *corral* al conjunto de *counters* que atienden un mismo grupo de vuelos y a su cola de pasajeros correspondiente.

Una vez en el mesón correspondiente a su vuelo, el equipaje es depositado en la cinta sobre una bandeja especial y la persona a cargo del mesón hace ingreso de este en el sistema utilizando una pistola de código de barras. A partir de este momento, el sistema controlador del BHS tiene registrada la posición de la maleta, conoce el carrusel que tiene por destino (que depende del *counter* por el que ingresó) y envía la orden de ingreso del equipaje a la cinta del colector. La maleta esperará en la entrada del colector hasta el momento que se genere una brecha espacial en el colector. Debe notarse que si por algún motivo el operario fuerza la entrada al colector o deposita un equipaje no registrado,

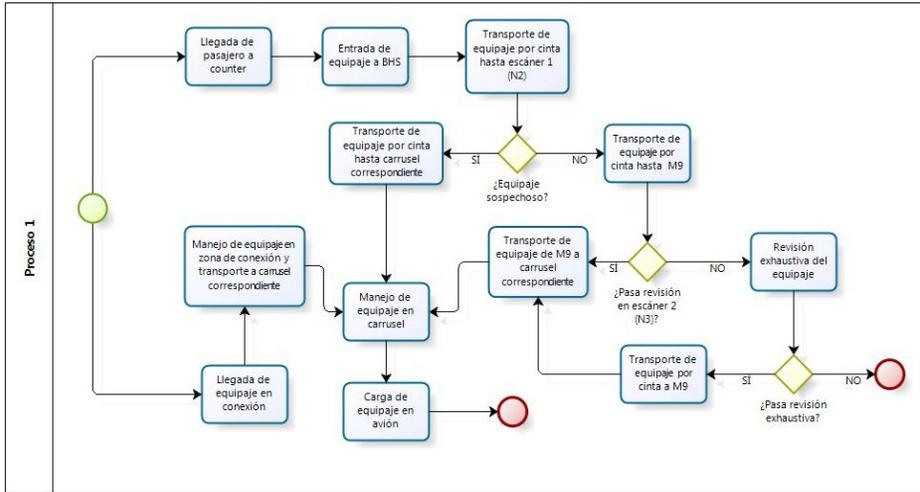


Figura 2: Esquema de operación del sistema BHS

éste será enviado directamente al sector M9.

En caso que el equipaje exceda las dimensiones de la cinta, el personal del aeropuerto lo llevará desde el mesón hasta la cinta de sobredimensionados, donde es escaneado y enviado directamente al PEQ. Esta cinta se utiliza también en el caso que ocurra una falla que imposibilite el descenso normal de equipaje por alguna T.

Patio de Equipajes (primer piso) Una vez dentro del colector, la maleta desciende hasta el escáner N2 y llega al patio de equipajes. Luego de la salida del escáner se encuentra con un *diverter* (sistema de palas metálicas) la cual la desviarán hacia alguno de los dos carruseles dependiendo del mesón por donde ingresó o, en caso de haber sido encontrada sospechosa en el escáner, seguirá directo hacia la cinta L3.

Asumiendo que la maleta arriba sin contratiempos al carrusel que le corresponde, permanecerá ahí dando vueltas hasta que un operario de la empresa a cargo del vuelo la retire. A partir de este punto el proceso es principalmente manual y se denomina “preparación del vuelo”. En primer lugar se segrega y deposita en carros el equipaje que ha llegado a cada carrusel de acuerdo al vuelo que pertenece, proceso a cargo de uno o dos operarios, dependiendo de la complejidad del vuelo. Para distintos tipos de vuelo, los operarios estarán disponibles entre 90 a 150 minutos antes de la salida del vuelo. Entre veinte a catorce minutos antes de la hora de salida del vuelo estos contenedores salen hacia el avión, quedando en tierra cualquier maleta no cargada hasta ese momento.

Existen dos reglas de asignación de operarios utilizadas en el patio de equipajes. El *sistema operativo-vuelo* en la cual cada operario es asignado exclusivamente a la preparación de un único vuelo, tal como fue descrito en el párrafo anterior. La regla alternativa se denomina *sistema pool*, en el cual se asigna un grupo de operarios al trabajo de un carrusel y es el jefe de este grupo (llamado coordinador) quien debe priorizar la carga de los vuelos. El sistema *pool* se utiliza principalmente en la preparación de vuelos domésticos de baja complejidad, mientras que la asignación operario-vuelo se usa en el caso de los destinos internacionales.

En caso que la maleta haya sido desviada hacia la cinta L3, ésta llegará hasta el final del patio, donde pasará por un nuevo escáner (N3). Si luego de la segunda revisión la maleta aún está bajo sospecha, ésta será desviada al sector de mayor nivel de seguridad para una revisión exhaustiva. Una vez superados los controles de seguridad los equipajes arriban al carrusel M9, donde un operario de la empresa a cargo del vuelo deberá registrar su llegada en el sistema y colocarla en un carro que la lleve hasta el carrusel donde se está preparando su vuelo o en caso de estar cerca de la hora de salida del vuelo, la trasladará directamente el avión.

3. Herramienta de Simulación del BHS

Para poder entender dónde se producen los cuellos de botella en situaciones de alta demanda y analizar en profundidad distintas medidas y escenarios posibles de implementar en el sistema de procesamiento de equipajes que llegan al aeropuerto, se decidió programar un simulador del sistema, desde la llegada de los pasajeros a su respectiva cola para ser atendidos en *counters* hasta que el equipaje es puesto en el carro que lo llevará al avión. La necesidad de partir la modelación en las colas de los *counters* se debe a que varios de los escenarios bajo estudio tienen un impacto potencial en los tiempos de espera de los pasajeros en los corrales antes descritos.

El simulador fue programado utilizando el paquete de microsimulación de tráfico QUADSTONE PARAMICS v6. Esta plataforma utiliza un esquema de simulación de tiempo continuo, donde el estado de cada entidad es actualizado cada medio segundo. Una contribución importante de este trabajo es adaptar el modelo cuyas entidades originalmente correspondían a vehículos moviéndose en las calles, al caso de representar entidades que ahora son maletas moviéndose a lo largo de las cintas transportadoras del sistema BHS. En simulación microscópica de tráfico se codifica una red vial fija, un conjunto de zonas (que representan los orígenes y destinos de los viajes) y varias entidades que se des-

plazan por la red entre estas zonas con el fin de satisfacer tales necesidades de viaje. La mayor ventaja de este programa, y principal motivo para elegir el uso de un simulador de tráfico, está en que mediante el uso de APIs (*Application Programming Interface*) es posible controlar todos los parámetros y variables de la simulación en todo momento, haciendo factible la adaptación de los modelos de tráfico a la lógica de la red de manejo de equipaje.

Las principales ventajas de usar esta metodología de adaptación de un modelo de tráfico para emular el funcionamiento de un BHS son las siguientes: Flexibilidad de modelación. A través de la API y la implementación de módulos programados en C++, es posible aumentar las capacidades del software a escenarios distintos a los que por defecto corresponden a la simulación del tráfico urbano. Así, en este caso se modeló la llegada de pasajeros, atención en *counters*, conexiones, y recepción y carga de maletas en el patio de equipajes a través de módulos programados en C++ que interactuaban con el simulador del BHS.

Representación del comportamiento del BHS. Una vez que se adaptó apropiadamente el programa a la lógica de movimiento de las maletas sobre el sistema de cintas transportadoras, fue posible modelar de manera satisfactoria y muy realista el comportamiento mecánico de las cintas, especialmente las reglas de prioridades en las intersecciones, detenciones de cinta y cambios de velocidad por tramos.

Nivel de detalle. PARAMICS permite controlar todos los elementos del simulador en intervalos de medio segundo o menos, de esta manera es posible rastrear la posición y estado de todos los elementos del simulador al nivel de detalle que se requiera para cada experimento.

Capacidad gráfica. PARAMICS permite generar una representación gráfica del funcionamiento del BHS de manera directa y amigable. Además, permite comunicar resultados en un lenguaje natural a cualquier público.

De los cuatro módulos principales estudiados, los sectores de *counters* y el PEQ se encuentran programados “sobre” PARAMICS, es decir, son ejecutados independientemente y terminan con la creación de un evento en la red (ej. creación de maletas) o se ejecutan en respuesta a un evento (ej. llegada de un equipaje a una zona de destino). Por otro lado, los módulos BHS y Conexiones son modificaciones al comportamiento de las entidades en la red y se encuentran en constante ejecución durante la simulación.

El simulador está formado por cuatro módulos fundamentales, los cuales operan de manera conjunta e interconectada. Estos son sector *counters*, comportamiento BHS, patio de equipajes y conexiones. En las siguientes subsecciones se detallará el funcionamiento de cada proceso.

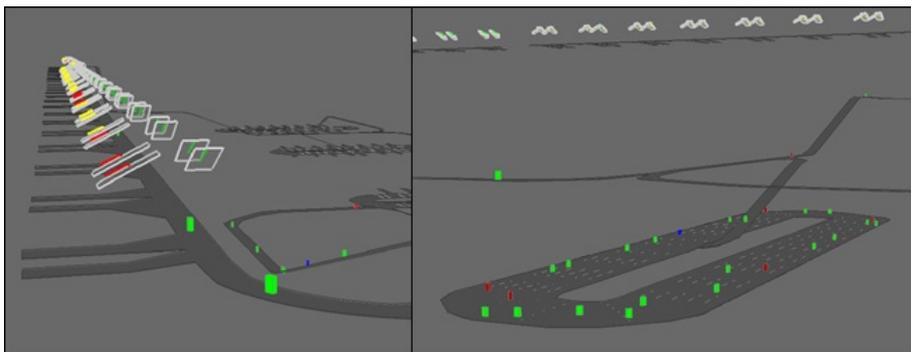


Figura 3: Sector de *counters* (izquierda) y carrusel (derecha) modelados en PARAMICS

3.1. Sector *Counters*

Este módulo se encarga de representar: llegadas de pasajeros al aeropuerto, colas, asignación de corrales, atención de pasajeros e ingreso de equipajes al BHS. El diagrama de la figura 4 muestra el proceso.

Generación de Pasajeros Se utiliza el itinerario del día y la proyección de pasajeros del *booking* para determinar la cantidad de pasajeros por vuelo. Gracias a estudios realizados previamente por las aerolíneas se conoce la distribución del momento de llegada de los pasajeros al terminal para la mayoría de los vuelos. En los casos en que ésta se desconoce, se estima la cantidad de pasajeros utilizando el itinerario y el tipo de aeronave utilizada. La llegada de los pasajeros se supone igual a un vuelo de similar destino que tenga distribución conocida.

Cabe mencionar, que se decidió trabajar con distribuciones de llegadas empíricas, por un lado porque es un dato de fácil acceso que la aerolínea mantiene actualizado, y por otro porque no es posible encontrar una distribución teórica que se ajuste adecuadamente a todos los vuelos.

Utilizando estas distribuciones, se sortean para cada pasajero en forma independiente el intervalo de 5 minutos en que arribará al terminal, y dentro de dicho intervalo el momento exacto sigue una distribución uniforme discreta. Todos los pasajeros son generados al momento del inicio de la simulación.

Asignación de Corrales Como se mencionó anteriormente, un corral consiste en una fila de pasajeros y un grupo de *counters* que la atiende. Salvo casos excepcionales, varios vuelos se encuentran asignados a un mismo corral. En la medida que los pasajeros (generados anteriormente) van llegando al terminal, van ingresando a la cola correspondiente al corral asignado a su vuelo.

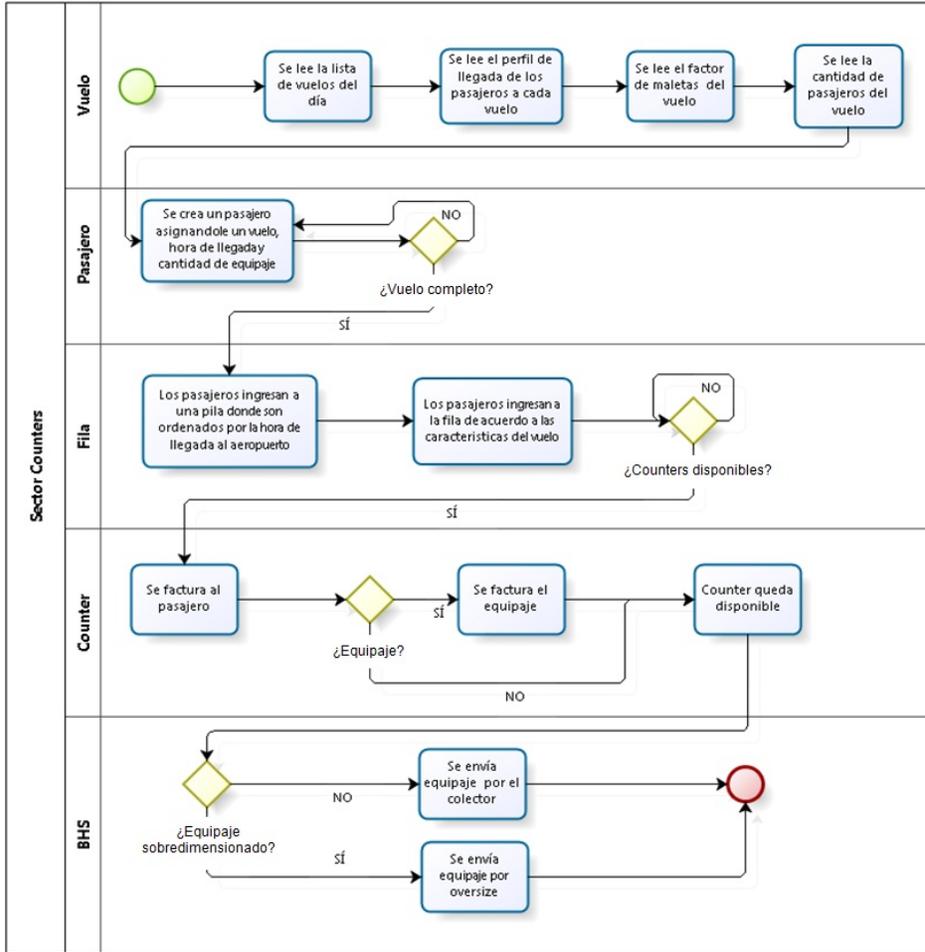


Figura 4: Diagrama de flujo de operación del sector *counters*

El simulador está diseñado para tener la mayor flexibilidad en la atención de las filas por los *counters*. Para modelar este proceso en forma realista y rigurosa, al simulador se le entrega el horario de funcionamiento de cada *counter*, las filas que atiende y el carrusel destino que tendrán los equipajes por allí ingresados.

Aunque la cantidad de *counters* abiertos de cada aerolínea obedece a una asignación diaria inicial, a lo largo del día y en la medida que las condiciones de la operación lo ameritan se vuelve necesario modificar dicha asignación y redistribuir el personal. Para dar al simulador la capacidad de reasignar de forma dinámica los *counters*, cada diez minutos de simulación se ejecuta una rutina que evalúa las condiciones de las filas de espera de cada aerolínea (principalmente el tiempo de espera estimado para los pasajeros y la proximidad de la salida del vuelo) y reasigna los recursos según sea posible.

Atención en counters A través de mediciones en terreno, se estimó que el tiempo de atención de un pasajero en el *counter* se compone de la siguiente forma:

Tiempo de atención total = Tiempo de registro en el sistema + 30 seg por maleta.

Para determinar el tiempo de registro en el sistema, se realizó un análisis estadístico de tiempos de atención en base a las mediciones periódicas que efectúan las aerolíneas, con datos que abarcan desde Enero a Junio del año 2011, para las distintas filas existentes. La cantidad de maletas de cada pasajero es una variable aleatoria distribuida uniforme discreta. Las aerolíneas conocen el *factor de maletas* de cada vuelo, es decir, la cantidad promedio de equipajes por pasajero. Este factor es actualizado constantemente de acuerdo a la temporada.

Creación de Maletas Una vez atendido el pasajero, pero antes de que su maleta sea creada en el sistema, se debe sortear cuál es la probabilidad que dicha maleta genere un atasco en la cinta. Para ello se realizaron mediciones en terreno que permitieron conocer los tipos de errores que se producen en *counters* y la probabilidad que éstos generen un bloqueo. Los datos fueron recogidos desde el 1 al 6 de Noviembre de 2010, y desde el 10 al 17 de Enero de 2011. En síntesis, se clasificaron los equipajes en cuatro categorías que se muestran en la tabla 1. A cada maleta creada se le asigna algún tipo de manera independiente.

Categoría	Descripción	Proporción
Tipo 1	Equipaje enviado sin bandeja	9,47 %
Tipo 2	Equipaje con ruedas hacia abajo o parado o con manilla arriba	27,55 %
Tipo 3	Equipaje parado y con ruedas abajo	0,47 %
Tipo 4	Equipaje OK	62,51 %

Tabla 1: Clasificación para el simulador de equipajes al ingresar vía *counter*

Finalmente existe una probabilidad de que el tamaño del equipaje sea mayor al permitido por la cinta. En ese caso en lugar de crearse en la cinta frente al *counter* se creará en frente de la cinta de sobredimensionado en una cantidad de unidades de tiempo más tarde dependiendo de la distancia entre el *counter* y dicha cinta.

3.2. Comportamiento BHS

Este módulo representa el núcleo del simulador y en él se encuentran todas las reglas de operación del BHS. En este módulo se definen las modificaciones que permiten representar el sistema de equipajes utilizando PARAMICS.

Comportamiento de equipajes en la cinta La primera rutina de este módulo consiste en adaptar el comportamiento de las entidades para que corresponda al de una cinta transportadora. En cada paso del reloj de simulación se define la velocidad de cada maleta de acuerdo a las siguientes reglas:

1. Si la maleta no es la primera en la sección de la cinta (llamada *Líder*) se fija su velocidad igual a la que está inmediatamente delante. En caso contrario se procede al paso 2.
2. Para la maleta *Líder*, se revisa primero la velocidad de la última maleta del tramo siguiente. Si aquella se encuentra detenida, estamos frente a un atasco (ver sección detenciones) y por lo tanto su velocidad es cero. En caso contrario, se fija la velocidad del *Líder* igual a la determinada para el tramo correspondiente de la cinta.

La velocidad de cada tramo de la cinta está determinada por las especificaciones de la cinta y sólo pueden ser modificadas por Aerotech, empresa a cargo de su funcionamiento.

Inyección de Maletas al Colector Cuando las maletas son creadas en el sistema, aparecen en una cinta que une el *counter* con la cinta colector de la T correspondiente. En el momento que el operario del *counter* pide al sistema ingresar una maleta al colector, ésta debe esperar hasta que exista un espacio suficiente en ella para poder ingresar. Sucede que en la medida que aumenta la cantidad de *counters* operando, aquellos ubicados “aguas abajo” tienen serias dificultades para poder inyectar las maletas, disminuyendo considerablemente su tasa de atención.

Para simular la forma en que el BHS inyecta maletas al colector de cada T, se utiliza esta rutina que inserta un semáforo en la intersección de ambas cintas y sólo permite la inyección de la maleta al colector si existe el espacio suficiente. Por ejemplo, en la figura 5, producto del flujo sobre el colector, los *counters* 4, 7 y 8 no pueden ingresar sus maletas a la cinta.

Esta misma rutina, pero con distintos tiempos de paso, se utiliza también en las demás intersecciones del sistema.

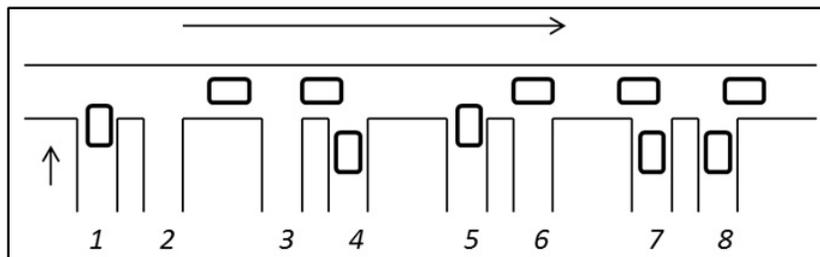


Figura 5: Ejemplo de funcionamiento y prioridades del colector

Detenciones de Cinta La probabilidad que una maleta produzca un atasco en algún punto de la cinta fue determinada al momento de su creación. Esta rutina hace efectiva esta probabilidad. Un atasco produce la detención de toda una sección de la cinta y de todos los tramos anteriores hasta llegar al colector en el sector de *counters*. Sin embargo, el sistema continúa funcionando normalmente aguas abajo del punto de detención.

Por simplicidad se definieron ciertos “puntos de detención” como los únicos lugares donde es posible que se produzcan incidentes dentro de la cinta. Estos puntos están localizados en aquellos lugares donde los atascos son más frecuentes. Cada vez que un equipaje pasa por un punto de detención, se sortea si se produce o no la detención así como su duración.

Categoría	Duración de la detención (seg)	Probabilidad de detención	Tipo de maleta asociado
Equipaje sin bandeja	$U[60, 120]$	5 %	Tipo 1
Equipaje en mala posición	$U[120, 360]$	1 %	Tipo 2
Equipaje en muy mala posición	$U[180, 300]$	50 %	Tipo 3

Tabla 2: Características de los tipos de detenciones

Redirección de Equipajes a M9 Por omisión, el destino de cada equipaje está definido por el *counter* en el cual ingresa al sistema. Sin embargo, en ocasiones es necesario redirigir este equipaje al sector de M9. Los casos más frecuentes son por haberse encontrado sospechosa en el escáner de seguridad o por haberse visto envuelta en algún atasco. Lo que hace esta rutina es cambiar la zona de destino del equipaje.

Escáneres N2 y N3 En cada T existe una máquina de rayos X que revisa todos los equipajes. Cada vez que un equipaje ingresa al tramo de la cinta que corresponde al escáner, se ejecuta con una probabilidad constante su redirección a M9, lo cual modela una maleta que ha sido encontrada sospechosa. En el caso del escáner N3, la rutina es la misma, salvo que redirige el destino del equipaje hace el sector de escaneo de alta seguridad.

Escáner de Alta Seguridad Cuando alguna maleta se redirigida a esta zona, se detiene en el lugar del escáner por un tiempo aleatorio y luego es reingresada a la red por el punto de salida.

Ingreso y Estadía en Carrusel Los carruseles están formados por tramos de cinta con varias pistas (en el lenguaje de simulación de tráfico). Esta condición se aplica para simular la realidad, donde los equipajes se van apilando unos encima de otros a medida que el carrusel se llena. Por esta circunstancia el ingreso a carrusel es distinto a las intersecciones normales modeladas con la rutina inyección al colector.

Cuando llega una maleta a la entrada del carrusel proveniente de *counters*, se revisa la cantidad de equipajes en el primer tramo del carrusel. Si las tres líneas se encuentran ocupadas, la maleta deberá esperar hasta que exista un espacio en alguna de ellas donde pueda ingresar. En el caso de los equipajes que no provienen de *counters*, estos ingresan por una pista especial al carrusel y sólo requieren que exista algún espacio suficiente de ingreso que esté disponible.

3.3. Patio de Equipajes

Las rutinas del módulo de Patio de Equipajes principalmente controlan la salida de las maletas del sistema o definen el estado de los recursos del sistema.

Atención en Carruseles Se ejecuta cada vez que un equipaje pasa por el punto de salida del carrusel. Esta rutina tiene dos variantes dependiendo del tipo de política de atención que se esté implementando. En el caso de tener personal específico trabajando en cada vuelo se tiene:

1. Si la maleta pertenece a un vuelo cerrado, se registra el arribo tardío y se elimina del sistema.
2. Se revisa si el equipaje pertenece a un vuelo que esté ya sea en preparación o en cierre. Si no, el equipaje da otra vuelta al carrusel.
3. Se revisa si existe personal asignado a ese vuelo disponible. Si no, el equipaje da otra vuelta al carrusel.

4. Se recuerda la hora y lugar de retiro del equipaje. El operario queda ocupado por un tiempo distribuido exponencialmente.

En el caso alternativo que el personal sea asignado al carrusel y no a un vuelo específico, la rutina cambia ligeramente para revisar que exista personal total disponible.

Gestión de Personal En realidad corresponde a una serie de rutinas que gestionan constantemente la cantidad de personal disponible en los distintos puntos del aeropuerto. A continuación, se entrega una breve descripción de estas funciones:

Disponibilidad de personal asignado: El total de personal disponible en cada puesto de trabajo a lo largo del día es definido como un parámetro de la simulación. Este conjunto de rutinas actualiza constantemente el personal máximo disponible en las diferentes posiciones de acuerdo a dicha planificación.

Liberar operarios ocupados en carruseles: En cada paso del reloj se revisa si alguno de los operarios ocupados está nuevamente disponible. El tiempo que un operario se demora en procesar una maleta se distribuye exponencialmente con tasa μ [maletas/minutos], por lo tanto, si se destinan n operarios en el mismo vuelo o carrusel, tendremos que el tiempo que se demora en quedar libre el primero de los n operarios se distribuirá exponencialmente con media $1/(n\mu)$ [minutos]. .

Estado de los Vuelos En cada minuto de simulación se actualiza el estado de todos los vuelos. Los estados posibles son:

Pendiente: corresponde al estado inicial de todos los vuelos y significa que no se han ejecutado acciones relacionadas con él. Una maleta de un vuelo pendiente tendrá la menor prioridad para ser procesada.

En preparación: significa que los operarios del patio han comenzado a buscar activamente las maletas de este vuelo y a colocarlas en carros. Equipajes que se encuentren en el sector M9 serán redirigidos a los carruseles correspondientes.

En cierre: a partir de veinte minutos antes de la hora de salida, un vuelo ingresa en esta etapa, lo que significa que los procesos se aceleran y los equipajes que están en M9 son enviados directamente al avión en lugar de retornar al carrusel.

Cerrado: El vuelo no admite más equipajes. Cualquier equipaje que arribe después de este momento se considera irremediablemente perdido y es eliminado del sistema. En la práctica estos equipajes deberán ser reprogramados para ser enviados en el siguiente vuelo al mismo destino.

Atención en M9 y Redirección de Equipajes El carrusel M9 (donde llegan las maletas con problemas) funciona similarmente a los otros ocho carru-

seles, salvo dos excepciones: primero, siempre se trabaja con una cantidad fija de operarios que vigilan todos los vuelos que llegan y segundo, las maletas en lugar de ser eliminadas del sistema deben ser colocadas en pilas especiales para regresarlas al carrusel donde originalmente debieron llegar (si es que se dispone del tiempo suficiente antes de la salida del vuelo).

El regreso de los equipajes desde M9 a los respectivos carruseles ocurre cuando alguna de las pilas de equipajes alcanza el tamaño máximo o se ha cumplido el límite de tiempo desde la última devolución. Cualquiera sea la condición, se reparten todos los equipajes pendientes. Esta rutina crea (en una cantidad de unidades de tiempo que depende de la distancia entre M9 y el carrusel correspondiente) nuevas maletas con el mismo número de identificación que las que se entraban en la pila. Estas maletas son creadas en la pista especial para ingreso de cada carrusel.

3.4. Parámetros del Simulador

Los parámetros utilizados por el simulador se dividen en:

- (a) *Parámetros históricos*: Son aquellos parámetros que no cambian en cada escenario. Estos parámetros provienen de mediciones, estimaciones o información histórica proporcionada por las compañías aéreas. Esto no significa que no puedan ser modificados, ya que pueden actualizarse para recrear de mejor manera el día que se quiere simular.
- (b) *Parámetros de escenario*: Para construir diferentes escenarios de un mismo día simulado, se debe cambiar un set limitado de datos, por ejemplo la cantidad de operarios de *counters* atendiendo o el carrusel del patio de equipaje que atenderá a cada vuelo, dependiendo del fenómeno que se quiera estudiar.

En la tabla 3 se describen los parámetros más relevantes del sistema, clasificados como parámetro histórico o de escenario.

3.5. Salidas e Indicadores

El resultado de cada simulación consiste en el detalle de la vida de cada maleta que pasa por el sistema. En particular es posible registrar los siguientes indicadores asociados a una maleta específica:

- Identificador único de cada maleta.
- Vuelo al que pertenece.
- *Counter* por el que ingresó al sistema.

Elemento del simulador	Parámetro	Tipo
Llegada de pasajeros	Itinerario de salida y llegada de vuelos	Histórico
	Perfil de llegada de pasajeros	Histórico
	Pasajeros por vuelo	Histórico
	Maletas por pasajero	Histórico
Counter	Errores en ingreso del equipaje al sistema	De escenario
	Cantidad de countesr abiertos a lo largo del día	De escenario
	Tiempo de atención en <i>counter</i>	Histórico
	Porcentaje de pasajeros Bag Drop por vuelo	Histórico
	Carrusel al que debe llegar el equipaje según vuelo	De escenario
BHS	Velocidad de las correas	Histórico
	Tasa de maletas que terminan en L3	Histórico
Patio de equipajes	Velocidad de procesamiento de maletas por operario	Histórico
	Número de operarios en el patio	De escenario
	Largo del intervalo de atención de un vuelo	De escenario
	Cantidad de operarios que atienden un vuelo	De escenario
Sector de equipaje en conexión	Velocidad de procesamiento de maletas por operario	Histórico
	Número de operarios en el patio	De escenario
	Largo del intervalo de atención de un vuelo	De escenario
	Cantidad de operarios que atienden un vuelo	De escenario

Tabla 3: Parámetros utilizados por el simulador para construir escenarios

- Instante en que ingresa al BHS por *counter*, sobredimensionados o conexiones.
- Instante en que pasa por el escáner N1.
- Instante de llegada al carrusel.
- Instante de salida del carrusel hacia el avión.
- Instante de salida de M9, hacia el avión o de regreso a otro carrusel.

- Instante en que abandona el área de conexiones.
- Instante de eliminación por atraso.
- Instante salida vía sobredimensionados.

Adicionalmente se recolectan estadísticas de cada pasajero simulado:

- Número de vuelo.
- Fila en que se atendió.
- Cantidad de maletas.
- Hora de llegada a la fila.
- Hora de llegada a *counters*.
- Tiempo que demoró su atención en *counters*.

Con esta información y de acuerdo a lo requerido en cada experimento, se calculan los indicadores de rendimiento que permiten comparar los resultados de las distintas instancias. Los más frecuentemente usados son:

Maletas cargadas por vuelo: naturalmente interesa conocer que porcentaje de los equipajes de cada vuelo es cargado con éxito. Se calcula un llamado perfil de carga, que corresponde a la cantidad de equipajes que han salido del sistema en función del tiempo restante para la salida del vuelo. Este indicador se suele analizar en forma agregada para vuelos similares, como por ejemplo “nacional norte”.

Carga del carrusel: corresponde a la cantidad de maletas que pasarán por cada carrusel en intervalos de cinco minutos. Se utiliza para estimar el nivel de saturación y se calcula para cada M por separado.

Tiempo de espera en fila (TEF): corresponde al tiempo de espera promedio de todos los pasajeros que arribaron a una fila durante la última hora. Se calcula para todas las filas y a lo largo de todo el día.

Uso de cinta de sobredimensionados: corresponde a la fracción del tiempo que es utilizada esta cinta, considerando su uso normal para bajar equipajes, subir bandejas y en casos especiales para hacer frente a contingencias.

Simultaneidad en colector: para un instante dado, corresponde a la cantidad de vuelos pertenecientes a la misma T que saldrán dentro de un horizonte definido, generalmente durante la próxima hora.

Simultaneidad en carrusel: definido en forma similar al indicador anterior, pero en este caso correspondiente a los vuelos que están siendo preparados en cada carrusel simultáneamente.

4. Aplicaciones

En esta sección se ilustra el potencial de análisis de la herramienta de simulación discutiendo dos aplicaciones. Primero, se muestra un análisis sobre el impacto de las detenciones de la cinta transportadora ocasionadas por una manipulación inapropiada del equipaje en *counters* y luego se estudian los efectos de una posible modificación en la asignación de los *counters* en el sector de embarque.

4.1. Manipulación de Equipajes en *Counters* y Detenciones del BHS

El principal problema en la operación de las cintas de transporte del BHS son los atascos de equipajes. Además de la disminución de la tasa de procesamiento de equipaje por el tiempo inactivo, detenciones de pocos minutos pueden llevar a disrupciones más graves que involucren la pérdida de rastreo de un grupo de equipajes y su redirección a M9. Estos problemas tienen su origen en una mala disposición de equipajes potencialmente complicados en la cinta al momento de ingreso al sistema en el *counter*. Esta característica ha sido modelada como fue descrita en la sección anterior y los casos corresponden a los tipos 1 a 3 descritos en la Tabla 1 (equipaje sin bandeja cuando debe llevarla o mal posicionado en la cinta).

Para evaluar el impacto de esta operación, se analizaron escenarios donde la proporción de estos equipajes que pueden causar problemas fuera menor que la de la situación actual. De estos análisis se determinó que si la proporción de equipajes mal despachados se reducía en al menos un 70 % respecto de la situación base, el funcionamiento del BHS debería alcanzar los niveles descritos por el fabricante.

Estos hallazgos fueron comprobados en una experiencia limitada realizada en la T3 durante dos semanas del mes de Julio de 2011. Durante este periodo casi no se produjeron detenciones en la cinta y se alcanzaron los niveles de operación predichos por la simulación. La Figura 6 muestra el número de maletas que ingresa al sistema por la T3 por hora móvil entre las 6.30 y las 8.30. Los valores que se muestran son los promedios de los distintos días. La curva azul muestra los valores observados para las otras dos semanas del mes usadas como referencia.

Para reducir la cantidad de equipaje que potencialmente podría detener la cinta, se tuvo que modificar el protocolo de manejo en *counters*. Se requirió a

los agentes que todos los equipajes que pudieran ser enviados en bandejas, lo fueran. Con esto se alcanzó una reducción de casos potenciales entre un 70 y un 80 % consistente con el escenario de análisis de la simulación. La utilización de bandejas de manera masiva agregó el problema de su manipulación y reposición ya que los inventarios actuales y sus políticas de manejo no consideraban este uso intensivo. Para la experiencia fue entonces necesario definir también un procedimiento de reposición periódica de bandejas, el que utilizó la cinta de equipaje sobredimensionado 1 a 2 veces en la hora con la dirección revertida (del patio a sector embarque).

4.2. Segregación de Vuelos y Asignación de *Counters*

De acuerdo a las políticas de trabajo en el patio de equipajes, los carruseles son asignados a los vuelos de distintas compañías de acuerdo, principalmente, a cuál operador administra sus equipajes y a agrupaciones de vuelos que tienen que ver con políticas comerciales. Recordemos que el BHS permite el ruteo de maletas asignando los equipajes chequeados en cada *counter* a un carrusel de destino. De esta manera, es usual que las compañías que separan sus vuelos en más de un carrusel definan corrales en el sector de *counters* que agrupan los pasajeros de los vuelos atendidos en el mismo carrusel. A modo de ejemplo, podemos considerar el manejo de los vuelos nacionales de LAN que los separa en dos corrales distintos, uno correspondiente a los vuelos al norte del país y el otro que atiende a los vuelos con destinos en el sur del país. Observemos que dos tipos de modificaciones son posibles: un cambio en el número de *counters* que conforman el corral que atiende a los pasajeros de un grupo de destinos determinado y modificaciones en la forma que se agrupan los vuelos.



Figura 6: Número promedio de maletas ingresando al BHS por sector T3 por hora móvil. Operación actual y piloto corresponden a valores promedio durante los días hábiles de dos semanas de julio de 2011

Las agrupaciones utilizadas actualmente por las compañías están restringidas por la política de asignación de *counters* que tiene el aeropuerto y dentro de estas condiciones, están definidas de acuerdo a la experiencia de los encargados y en general consiguen mantener los tiempos de espera de todos los pasajeros dentro de márgenes razonables que en la mayoría de los casos satisfacen los niveles estándar de calidad de servicio definidos. Desde el punto de vista del trabajo en patio, una asignación más equilibrada permite un trabajo más ordenado y con carga pareja a lo largo del turno, lo que facilita la faena.

Como ilustración de los análisis posibles, consideremos la configuración a los *counters* del sector T2 utilizada durante la temporada alta 2011-2012. Este uno de los sectores que atiende vuelos internacionales en el Aeropuerto de Santiago. En particular, los vuelos internacionales de LAN, TAM y otras compañías son despachados por este sector.

La configuración utilizada determinaba que aproximadamente el 75 % del equipaje de la T2 fuera procesado en el carrusel M4 y solo un 25 % en el carrusel M3. La configuración alternativa que analizamos contempla reasignar a M4 los vuelos de la compañía LAN con destino a Isla de Pascua y algunos a Río de Janeiro que se asignaban a M3 y reasignar a M3 los vuelos con destino a Argentina, todos ellos asignados a M4, sin modificar los otros vuelos. Adicionalmente se reasigna uno de los *counters* del corral M4 LAN al corral M3 LAN.

Con las modificaciones se consigue despachar un 40 % del equipaje por M3, reduciendo a un 60 %, el equipaje despachado por M4. Esto se logra sin modificar prácticamente los tiempos de espera de los pasajeros ni los tiempos de llegada de las maletas a los carruseles y distribuyendo mejor el trabajo a lo largo del periodo. La Figura 7 ejemplifica el nivel de carga de los carruseles: las curvas muestran el número de maletas presentes en el carrusel durante un día de operación simulando las dos configuraciones.

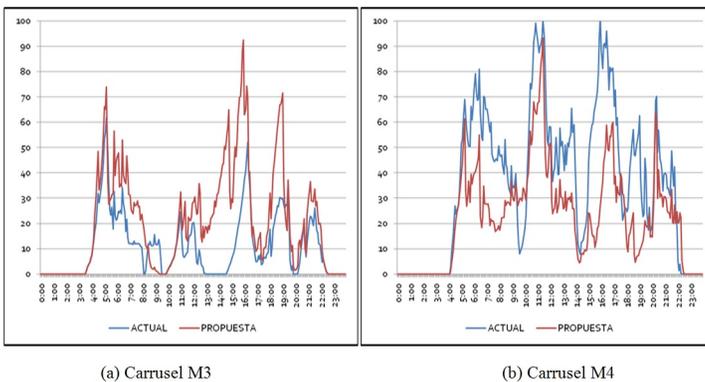


Figura 7: Número de maletas en los carruseles a lo largo de un día de operación

Como se puede apreciar, el uso de los carruseles ahora es más parejo durante todo el día. Además, con la configuración propuesta, no sólo se consigue equilibrar la carga de manera agregada sino que también se reducen el tiempo del día en que los carruseles están operando al nivel de congestión como resume el gráfico de la Figura 8.

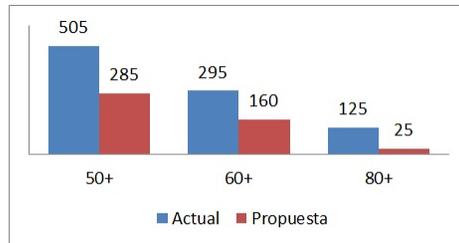


Figura 8: Minutos Diarios que los carruseles operan sobre determinados niveles de congestión: 50 o más maletas (50+), 60 o más maletas (60+) y más de 80 maletas (80+) según la configuración actual y la propuesta

5. Conclusiones

En este artículo se describe la construcción de una herramienta de simulación del sistema completo de traslado de las maletas para embarques (es decir, desde el área de *counters* hasta su ingreso al avión). La herramienta permitió encontrar los cuellos de botella en la operación, así como entender el funcionamiento de este complejo sistema con muchos procesos involucrados. Además, este simulador permite analizar alternativas hipotéticas de operación en patio e indirectamente en *counters*, así como medir capacidad del sistema bajo diversas modalidades de operación. Lo novedoso de esta herramienta es que fue construida sobre una plataforma de simulación destinada a simular el tráfico urbano, lo que permite analizar en forma muy precisa la complejidad del sistema de cintas transportadoras donde interactúa el movimiento del equipaje.

Una vez calibrada la herramienta, potencialmente es posible utilizarla para muchas aplicaciones interesantes, en particular la simulación de operaciones hipotéticas de escenarios de operación reales con el objeto de entender y cuantificar el impacto de diversas medidas de acción, y su impacto sobre los distintos indicadores del sistema. De tales resultados, es posible plantear políticas de operación para hacer más eficiente y ordenada la operación del sistema, así como tomar los resguardos necesarios y prepararse adecuadamente para

hacerse cargo de situaciones de contingencia, las que en la realidad ocurren frecuentemente en períodos de alta demanda e intensidad de uso del sistema.

Potencialmente la herramienta permitirá evaluar el rendimiento de diseños futuros del patio de equipajes, ampliaciones de capacidad, cambio de modalidad de operación y para estimar la dotación de personal necesaria para cumplir con las operaciones del PEQ ante distintos escenarios en el futuro.

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

- [1] G. Andreatta, L. Brunetta, , and L. Righi. Evaluating terminal management performances using SLAM: The case of Athens International Airport. *Computers & Operations Research*, 34:1532–1550, 2007.
- [2] H.W. Chun and R.W.T. Mak. Intelligent resource simulation for an airport check-in counter allocation system. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews*, 29:325–335, 1999.
- [3] P.E. Joustra and N.M. van Dijk. Simulation of check-in at airports. *In Proceedings of Winter Simulation Conference 2001*, pages 1023–1028, 2001.
- [4] I.E. Manataki and K.G. Zografos. A generic system dynamics based tool for airport terminal performance analysis. *Transportation Research C.*, 17:428–443, 2009.
- [5] Y. Park and S. Ahn. Optimal assignment for check-in counters based on passenger arrival behaviour at an airport. *Transportation Planning and Technology*, 26:397–416, 2003.
- [6] N.M. van Dijk and E. van der Sluis. Check-in computation and optimization by IP and simulation in combination. *European Journal of Operational Research*, 171:1152–1168, 2006.