

Influencia del modelo de gestión de puestos de estacionamiento en las emisiones gaseosas de las aeronaves y los GSE

Gabriel Ramírez-Díaz^{1,2}, Lucas Sznajderman^{1,3}, Carlos Trujillo¹, Alejandro Di Bernardi¹

¹Grupo Transporte Aéreo – UIDET GTA-GLAI, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Pcia. Buenos Aires, Argentina.

²CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas), Argentina.

³Comisión de Investigaciones Científicas - CIC, Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, Pcia. Buenos Aires, Argentina.

Resumen—La gestión de plataforma depende de múltiples parámetros, tales como: tipo de puesto, disponibilidad de servicios, exclusividad de uso e interacción con la parte pública, entre otros. Si bien dichos parámetros son de carácter operacional, impactan directamente sobre la dimensión ambiental.

El objetivo del presente estudio es analizar el concepto de plataforma híbrida con un número fijo de posiciones de estacionamiento observando la influencia del modelo de gestión sobre la demora promedio por aeronave y las emisiones gaseosas generadas por las aeronaves y los vehículos de asistencia en tierra (Ground Support Equipment GSE).

La plataforma se estudia considerando dos modelos de gestión de puertas (puestos de estacionamiento): en el primer modelo, las aeronaves se asignan considerando únicamente factores operacionales, en el segundo modelo, se incluyen reglas de uso exclusivo de puestos según línea aérea. Para los modelos de gestión propuestos se cuantifican y comparan las emisiones producidas por la operación de las aeronaves (en la plataforma y rodaje asociado), y GSE, producto del servicio y circulación en rampa. El estudio contempla distintas condiciones de demanda generadas a partir del día promedio del mes pico de un aeropuerto regional; posteriormente, a través del software SIMMOD Plus, se simulan las operaciones de las aeronaves. La asignación de puestos y horarios de arribo se utilizan como datos de entrada para el estudio de los GSE a través de un modelo analítico de desarrollo propio. Una vez caracterizada y evaluada la dimensión operacional, se obtienen los datos necesarios para cuantificar las emisiones gaseosas de las fuentes (Aeronave-GSE), bajo los lineamientos propuesto por la OACI.

Palabras clave—plataformas, gestión, emisiones, capacidad, vehículos de asistencia, aeronaves.

Abstract—The apron management depends on multiple parameters, such as: type of parking position, availability of services, exclusivity of use and interaction with the public side, among others. Although these parameters are of an operational nature, they have a direct impact on the environmental dimension.

The purpose of this study is to analyze the concept of an hybrid apron with a fixed number of parking positions seeing the management model influence for de average delay per aircraft and the gaseous emissions generated by aircrafts and ground support equipment (GSE) altogether.

The apron is studied in based on two gate management models: in the first model, the aircrafts are allocated in each gate due to operational factors only; in the second model, the rules of exclusive use of each gate are included according to the airline. The emissions generated by the aircrafts operations (on apron and taxiing) and that of their GSE (produced by the service and movements on apron) are quantified and compared for the two gate management models. The study considers different demand conditions obtained from the average day of the peak month of a regional airport; subsequently, through the SIMMOD PLUS software, the aircrafts operations are simulated. The gates assignment and the arrival timetables are used as inputs for the GSE study due to an analytical model of own development. Once the operational dimension is characterized and evaluated, all the necessary data is obtained to quantify the gaseous emissions from the sources (Aircraft-GSE), based on the ICAO guidelines.

Keywords—Aprons, management, emissions, capacity, ground support equipment, aircraft.

INTRODUCCIÓN

Los aeropuertos son nodos críticos en el sistema del transporte aéreo, y como tales, se enfrentan a diversos desafíos, entre los cuales se encuentra el desarrollo sustentable de sus infraestructuras, quienes deben procurar un diseño equilibrado entre las dimensiones operacionales y ambientales.

Como indica (Wing et al. 2015) la industria de la aviación crece dentro de una red compleja de sistemas de sistemas. La complejidad de esta red resulta en demoras de muchas fuentes, incluidas las condiciones meteorológicas, restricciones de espacio aéreo y congestión de los aeropuertos. De las tres causas mencionadas, la principal fuente de demora está asociada a las condiciones meteorológicas, las cuales están más allá del control de la industria, en este contexto una de las temáticas a profundizar es la gestión en tierra aspecto abordado en este estudio.

Habitualmente el aeropuerto se divide para su análisis en dos subsistemas: parte aeronáutica (espacio aéreo, pista, rodaje y plataforma) y parte pública (terminales, estacionamiento, accesos).

Cada uno de los componentes de dicho subsistema reviste distintos niveles de complejidad, destacándose la terminal y la plataforma como los más complejos, producto del número de variables involucradas. El punto de unión entre estos dos subsistemas son las puertas (más conocidos por su palabra inglesa Gates).

En relación a la plataforma las principales variables que influyen en su diseño son: el segmento de mercado (regular, no regular, tradicional, low-cost, aviación general, carga), patrones específicos de tráfico (hubbing o punto a punto, estacionalidad de la demanda, entre otros), distribución del perfil de tráfico (picos-valles, franjas picos o mesetas), tiempo promedio de ocupación (SOT), número de puestos, clase de aeronaves (mezcla de la flota), política de uso de puesto (común, preferencial, exclusivo), estructura de la demanda, entre otros.

En base a la bibliografía analizada, una de las variables que ha captado los mayores esfuerzos académicos es la asignación de puertas, y por extensión y modo más genérico, la asignación de puestos, este aspecto se ha considerado y optimizado principalmente desde el punto de vista del diseño de la terminal y la operación de la parte aeronáutica del sistema. No obstante, el análisis de la dimensión operacional y ambiental en forma conjunta presenta pocos antecedentes, especialmente en lo que corresponde al análisis vinculado de las aeronaves y los GSE.

En el caso del presente estudio, el análisis se ha centrado en cuantificar el aporte contaminante producto de la operación de la plataforma, en este sentido se ha planteado distintas condiciones de asignación de puestos, a fin de evidenciar el impacto del modelo de gestión sobre las emisiones producto de las aeronaves, a su vez, y tomando en consideración que según (Sznajderman et al. 2016) la incidencia de los GSE en el aeropuerto de Ezeiza, representan dentro del total de emisiones del conjunto

Aeronave-GSE, el 21% del CO y el 15% del NO_x, considerando como aporte de las aeronaves el producido en el ciclo Landing Takeoff (LTO), tomando sus tiempos estándar. En aeropuertos tales como Copenhagen, Heathrow, Brisbane, San Diego, la incidencia de los GSE, APU y Motores principales en las emisiones de NO_x varían entre 5 a 9%, 2 a 9% y 87 a 93% respectivamente, considerando el aeropuerto en su totalidad (Winther et al. 2015).

Por otra parte, (Winther et al. 2015) presenta un inventario de emisiones del aeropuerto de Copenhagen (CPH), donde detalla la contribución de los motores principales, APU y GSE a nivel general del aeropuerto y a nivel del interior de la plataforma. Si se considera únicamente el complejo de la plataforma, los GSE contribuyen con 63% de las emisiones de NO_x, el 75% de Material Particulado (PM) y el 24% del consumo de combustible. Lo cual evidencia que el modo de operación de la plataforma (aeronaves-GSE) y la política de uso y asignación de puestos son susceptibles de presentar puntos de optimización de la dimensión operacional y ambiental. a partir de su consideración conjunta, sobre esta problemática se enfoca el presente estudio, en el cual se analiza la contribución de las aeronaves, los GSE y las emisiones totales bajo distintos modelos de gestión de las posiciones de estacionamiento. Continuando con el estudio de (Winther et al. 2015), se destaca que el cálculo del inventario se basa en lineamientos ampliamente aceptados y empleados en el análisis de sistemas aeroportuarios, dichos lineamientos han sido adoptados en el desarrollo del presente estudio.

En relación a otros estudios sobre emisiones, por ejemplo, (Kuzu 2017) analiza las emisiones en el aeropuerto de Estambul e identifica al rodaje y plataforma como el componente que mayor incidencia presenta sobre las emisiones, también toma en consideración, si las emisiones fueron por arriba o por debajo de determinada altura de la etapa de vuelo, y su incidencia en valores totales de emisión y de costo monetario, en base a datos de la UE.

(Simonetti et al. 2015) presenta un estudio de evaluación de calidad del aire del aeropuerto Américo Vespucio en Florencia, Italia, la herramienta utilizada es el Emissions and Dispersion Modeling System (EDMS), para el cual en una primera instancia se realiza un inventario de las emisiones y posteriormente se efectúa el cálculo de dispersión, el cual hace uso de los datos meteorológicos del emplazamiento, el cálculo del inventario se basa en el modelo ICAO FOA3.0.

Respecto a la dimensión operacional, se encuentra, por ejemplo, los estudios realizados por Mirkovic quien aborda el problema de la planificación y gestión de la plataforma. En (Mirković & Tosic 2011) se presenta una revisión de los modelos de capacidad existentes, los cuales, se basan en tiempo de servicio promedio definidos a partir de la demanda total. Asimismo, estos modelos se dividen en dos tipos: en el primero donde todas las aeronaves pueden usar todos los puestos; y en el segundo, donde se agrega un grado de complejidad asociado a que existen restricciones en el uso de puesto según dimensiones de la aeronave. En ambos casos, el máximo rendimiento de capacidad de la plataforma está definido como el número promedio de aeronaves que pueden

ser atendidas en 1 h, en presencia de una demanda continua (definida por la mezcla de la flota y mezcla de usuarios). Además (Mirković & Tosic 2011) desarrolla un modelo que provee una envolvente de capacidad para una plataforma con 11 posiciones, en la cual se gestiona la configuración de tipo de puestos (domésticos y mixtos), y se determina la capacidad para distintas cuotas de mercado (% de vuelos domésticos), el tiempo turnaround considerado es de 45 minutos para vuelos domésticos y 55 para vuelos internacionales.

En el caso de (Bandara & Wirasinghe 1989) proponen un modelo estocástico para estimar el número de puestos requeridos en función de los tiempos de ocupación y tiempos de separación entre aeronaves. En una extensión de su trabajo (Wirasinghe & Bandara 1990) un modelo de optimización que minimiza el costo por puertas y por demoras. En (Bandara & Wirasinghe 1992) se enfocan en la optimización de la configuración de la terminal y la asignación de puertas que permite minimizar la distancia que deben caminar los pasajeros dentro de la terminal.

Respecto al problema de optimización en la asignación de posiciones de estacionamiento existen varias publicaciones generalmente con el objetivo de minimizar la distancia recorrida por los pasajeros en el área terminal, los cuales se resumen en (Deng et al. 2018), a su vez (Deng et al. 2018) presenta el desarrollo de un algoritmo ICQACO de estrategia de optimización de múltiples objetivos: a) balancear los tiempos de inactividad de las puertas, b) mejorar el grado de satisfacción de los pasajeros (al reducir las distancias recorridas) y c) minimizar el número de aeronaves en plataforma (aeronaves sin asignación de puerta), el modelo es aplicado al aeropuerto de Guangzhou Baiyun (China)

(Guclu & Cetek 2017) propone un algoritmo de asignación de puestos y rodajes, y compara los resultados con los obtenidos a partir de simulaciones realizadas en SIMMOD (software que se utilizó en el presente estudio).

(Mirković & Tošić 2017) analiza el lado aire del aeropuerto a través del sistema de pista y el complejo plataforma-puertas, asumiendo un sistema de rodajes completamente desarrollado. Tal como afirman los autores existen pocos modelos analíticos que contemplan la capacidad de la plataforma.

Respecto a los grupos de vuelos relacionados, denominados Banks, se busca asignar posiciones de estacionamiento contiguas para facilitar las operaciones en tierra, (Steuart 1974) presenta una primer aproximación a la problemática, la cual es profundizada en (Hassounah & Steuart 1993) quienes modelaron el número de puertas requeridas en función del tiempo entre Banks (los grupos de vuelos se relacionaron asumiendo que se realiza entre ellos el traspaso de pasajeros y equipaje, además como simplificación considera que el comportamiento de cada aeronave del grupo es igual) para una demanda específica. En este caso se observa la importancia e interés de las líneas aéreas para disponer de posiciones de estacionamiento agrupadas para la operación, y la influencia de las mismas. Además, se evidencia que el modelo de gestión de posiciones de estacionamiento influye sobre la capacidad, en donde según las condiciones analizadas se puede llegar a requerir un 39% más de puestos.

Burghouwt (2007) analiza el impacto de la red de la línea aérea contemplando la concentración espacial y temporal

desde la perspectiva de la estructura del sistema, la conectividad y la capacidad de asiento. Sin embargo, no aborda las posibles repercusiones de las características de demanda específicas sobre la capacidad del aeropuerto, aspecto que estudia (Mirković & Tošić 2017), quien plantea una configuración de aeropuerto con 30 puestos (22 en contacto y 8 remotos) con cuatro configuraciones de demanda (caracterizado por el porcentaje de aeronaves livianas, medianas y pesadas) en función del tipo de aeropuerto considerado (HUB, MIXed Hub y O/D), además propone un comportamiento cíclico de la demanda el cual varía según clase de aeronave y tipo de aeropuerto. Los resultados le permiten concluir que las características asociadas al tipo de tráfico y los factores limitantes no pueden ser despreciados. Aspectos que han sido analizados también en (Ramírez-Díaz et al. 2016; Ramírez Díaz et al. 2017; Ramírez-Díaz et al. 2017b; Ramírez-Díaz et al. 2017a) para plataformas bajo el concepto lineal, espigón e híbrido con distintos patrones de demanda.

(Mota et al. 2017) analiza los potenciales problemas y limitaciones de capacidad de distintos diseños de plataforma, con el objetivo de identificar la mejor configuración según la función de costo-beneficio propuesta. Los resultados indican que es posible identificar una configuración que favorece a la reducción de los tiempos de turnaround y por ende los costos de la línea aérea, y una segunda configuración la cual permite tener una condición de respuesta más robusta, en contraparte un mayor tiempo de turnaround. Posteriormente (Mota et al. 2018) emplea un modelo basado en un “ciclo virtual”, el cual consta de dos modelos independientes, realimentándose uno a otro para optimizar la configuración de plataforma, por medio de este “ciclo virtual” logra determinar los grupos y cantidad de vehículos requeridos, según las dos configuraciones de plataforma propuestas (puestos autónomos y asistidos).

La consecuencia de la relación entre capacidad y demanda da lugar a distintos niveles de demora las cuales repercuten en el aspecto ambiental. En este sentido (Simaiakis & Balakrishnan 2009) propone un modelo de cola para reducir las emisiones en el proceso de partidas, considerando que el tiempo en dicha etapa se compone por: rodaje sin impedimentos, la duración en cola de partidas y la demora por congestiones debida a interacciones en rampa y rodajes. En base a ello propone un modelo predictivo que permite estimar el tiempo de taxi out y el estado de congestión de la superficie (en un modelo de gestión) para determinar si la aeronave debe dejar la puerta o no

(Janic 2016) presenta una metodología para el análisis, modelado y evaluación de la performance del uso de suelos por parte de los aeropuertos, tal como se observa en dicho estudio, la interacción entre las variables físicas, operativas, ambientales, económicas y sociales juegan un rol fundamental. Las características físicas, operativas y ambientales son abordadas directamente en el presente estudio.

(Kim et al. 2009) propone un modelo de simulación de asignación de puertas para predecir el tiempo operativo dentro de plataformas congestionadas, la aplicación de este tipo de modelos en tiempo real, permite reducir los tiempos en rampa en un 50%. Tal como indica el autor, para identificar los conflictos físicos, la primera actividad es estudiar la geometría de la rampa y las limitaciones físicas de la misma para comprender su dinámica. Las interacciones

y restricciones físicas y operativas incluyen: el rodaje de una aeronave que impide que otra aeronave efectúe el pushback, una plataforma estrecha o limitada en el número de puntos de acceso y salida (como, por ejemplo, los sectores con forma de herradura, o el concepto espigón), y largas colas de aeronaves esperando en la rampa el despeje del rodaje. Tales restricciones dependerán de la geometría de la rampa.

En los aeropuertos congestionados, muchas operaciones de taxeo sufren debido a las largas colas de aeronaves esperando en la calle de rodaje para acceder a la pista, las cuales a menudo generan otras filas de espera dentro del área de la rampa y, por lo tanto, introducen el bloqueo de pushback. Los procedimientos de pushback requieren suficiente espacio por seguridad, por otra parte, esta maniobra ocurre a una velocidad menor que la velocidad de rodaje habitual, por lo que la programación y el tiempo son un factor importante para evitar la congestión de la plataforma. En el caso de las horas punta, los bloqueos pueden presentarse incluso en las calles de rodaje.

(Carpenter & Stroiney 2012) indican que, en los principales aeropuertos de Estados Unidos, la gestión del tráfico de aeronaves se presenta en la plataforma y sus alrededores, lo cual conduce a ineficiencias en el área de movimiento que se ven reflejadas en la reducción de los tiempos de performance e incremento de demoras en el taxeo. En consecuencia, se genera un incremento de costos operativos e impacto ambiental producto de las emisiones originadas por la quema de combustible. Los autores emplean como datos de entrada de su modelo de gestión de puertas el “Surface Detection Equipment, Model X (ASDEX)” con el fin de caracterizar las demoras en taxeo, que impiden progresar en la secuencia de arribo. El aporte del modelo desarrollado consiste en estimar la fracción de demora correspondiente a rampa.

(Ferrulli 2016) presenta un marco de referencia para la evaluación de diseños de proyectos aeroportuarios en base a la performance de sustentabilidad, tal como lo indica, la capacidad ambiental y operativa se puede maximizar a través de una planificación a largo plazo que garantice una gestión ambiental efectiva, que compense el crecimiento mediante la introducción de estrategias de infraestructura, ecoeficientes desde punto de vista tecnológico y operativo. Esta problemática no es despreciable, ya que los limitantes ambientales afectan un gran número de aeropuertos. Por ejemplo, (Eurocontrol 2013) Indica que en el caso de Europa el 70% de los aeropuertos se ven afectados por limitantes ambientales.

Entre las problemáticas operacionales se encuentran la posibilidad de dar respuesta a una condición de demanda, atender dicho requerimiento implica considerar factores tales como: capacidad, impacto ambiental, competitividad territorial y condiciones seguridad operacional.

METODOLOGÍA

En el presente estudio se modelan distintos escenarios caracterizados por la política de asignación de puertas y la condición de demanda como función del número de operaciones hora, sobre los cuales se cuantificaron las emisiones gaseosas de CO y NOx producidas por las aeronaves y por los GSE.

Para el desarrollo se aplican tres modelos (ver Fig. 1), en la primera etapa se empleó la herramienta de simulación

SIMMOD Plus (denominado Modelo 1) para modelar la operación de la aeronave en tierra, el segundo modelo corresponde al desarrollado por (Trujillo et al. 2018) y sobre el cual se efectuaron modificaciones afin de poder contemplar un mayor número de escenarios operativos, este modelo (denominado Modelo 2) permitió considerar la operación de los GSE. El tercer modelo (denominado Modelo 3) responde a los lineamientos provistos por (International Civil Aviation Organization (ICAO) 2011) y ampliamente aplicados para el estudio de aporte contaminantes, tal como se observa en (Winther et al. 2015; Yilmaz 2017).

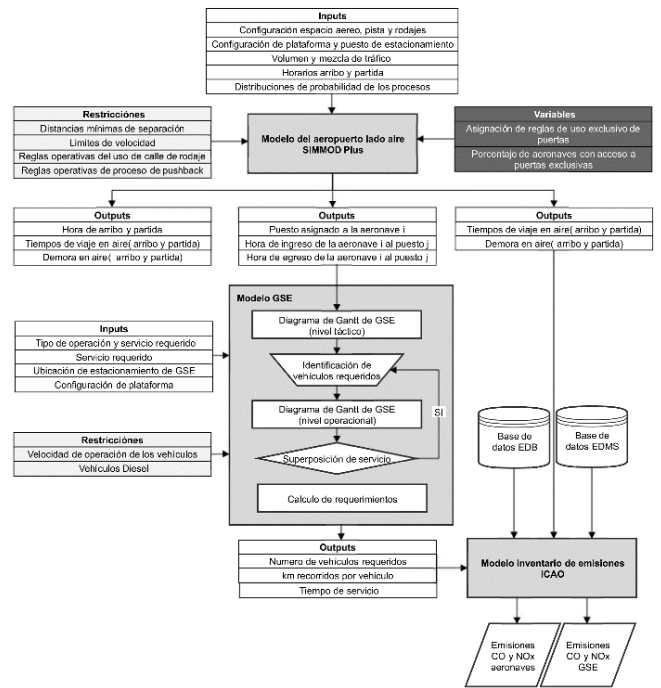


Fig. 1: Diagrama de la metodología general

Tal como se observa en el diagrama metodológico, el output provisto por el Modelo 1 alimenta al Modelo 2 y 3, en forma directa, de igual modo, el output del Modelo 2 alimenta al Modelo 3

Sobre cada escenario, en el Modelo 1, se efectúan 20 simulaciones, a fin de obtener valores medios y desviaciones estándar de los tiempos de rodaje y demoras representativos de la condición de análisis. A partir de las 20 simulaciones, se identifica una iteración con tiempos de rodaje y demora representativos de los valores medios, a fin de relevar la secuencia de asignación de puestos utilizada en dicha iteración. La secuencia de asignación de puertas correspondiente a la iteración seleccionada, se empleó como input del Modelo 2.

El Modelo 3 emplea como input, por un lado, los tiempos promedios de rodaje y demora de las aeronaves, producidos en la etapa de arribo y partida, provistos por el Modelo 1, y por otra parte; el Modelo 3 utiliza los tiempos de servicio y circulación de los GSE, los cuales son provistos por el Modelo 2. Cabe destacar que el tiempo de servicio en el Modelo 2, coincide con el indicado en el Airplane Characteristics for Airport Planning de cada una de las aeronaves de la flota, y se asume que el servicio provisto corresponde a turnaround full service.

Detalles de la infraestructura

La infraestructura modelada corresponde a una configuración de pista simple, provisto de un sistema de rodaje con un desarrollo suficiente para el sistema de pista al que sirve, por otra parte, ya que el principal objeto de estudio recae sobre el complejo de plataforma-puestos de estacionamiento, este se plantea con tres puntos de vinculación con el sistema de rodaje (ver Fig. 2).

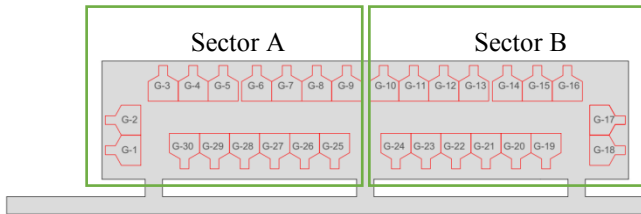


Fig. 2: Designación de puestos

La calle de rodaje en plataforma dispone de posiciones a ambos lados, dando lugar una configuración del tipo híbrido como la analizada en (Ramírez-Díaz et al. 2017b) donde se observa que, para condiciones de uso de puertas no restringido y con dos puntos de contacto con el sistema de rodaje, los tiempos de demora promedio para condiciones de demanda como la planteada en el presente estudio, presentan un comportamiento similar a una exponencial, la cual brinda dos zonas diferenciadas. En la primera zona las demoras disminuyen significativamente con el aumento del número de posiciones, en tanto que, en la segunda zona, la incorporación de puestos no genera una mejora sustancial. El punto que separa ambas zonas, varía con las características de la demanda. Por otra parte, a igual demanda y número de puestos, las demoras promedio se pueden reducir significativamente a través de la inclusión de puntos de ingreso y/o salida del sistema de plataforma, tal como se observa en el presente estudio.

La infraestructura ha sido modelada y caracterizada con 30 puestos tipo C, bajo el estándar de clasificación de la OACI, 10 en contacto y 20 remotos, la configuración de los puestos corresponde con maniobra de ingreso autónoma y salida asistida por pushback.

Caracterización de la demanda

Se propusieron distintos perfiles de demanda que usaron como línea base la hora pico de aeroparque 2017 identificada por (Trujillo et al. 2018), a fin de tomar una condición real de hora programada de arribo y partida. La demanda de la hora pico se replicó para la hora previa y la hora posterior, a fin de presentar la demanda dentro de una franja horaria que resulte representativa de un escenario operativo real, posteriormente sobre la línea de base (36 movimientos de arribo en tres horas) se realizaron modificaciones con el objeto de generar distintos escenarios de demanda.

Las modificaciones incluyeron, cambios en la demanda (operaciones/hora), en la proporción de aeronaves pertenecientes a la línea aérea con exclusividad/prioridad de uso de puestos.

En la siguiente figura, se presenta los perfiles de arribos y partidas, simulados en el modelo 1.

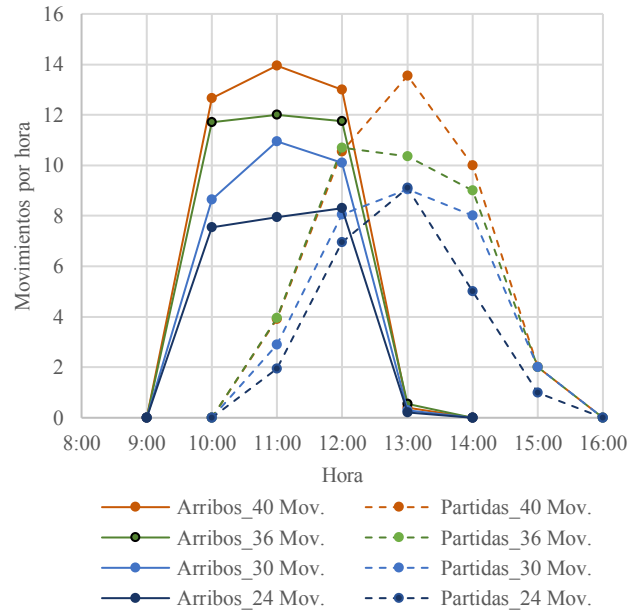


Fig. 3: Perfiles de demanda simulados

En relación a los tiempos de servicio, se emplearon tiempos reales de horarios programados, con un tiempo mínimo y máximo de 50 y 150 min respectivamente. la distribución de frecuencia acumulada de la siguiente figura resume dicho patrón, en el cual se observa que aproximadamente el 40% de las aeronaves presentan un tiempo de turnaround inferior a los 70 minutos.

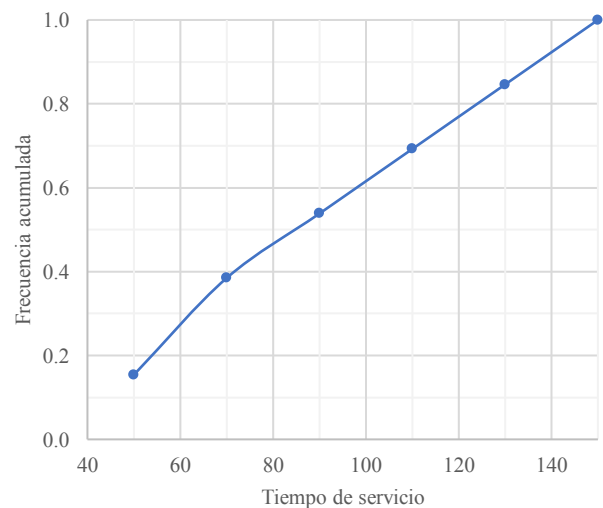


Fig. 4: Distribución de tiempos de servicio del proceso de turnaround

Como se observa en (Ramírez Díaz et al. 2017) las distribuciones de probabilidad generan aleatoriedades que impactan sobre las horas programadas de ejecución del proceso y en consecuencia repercuten en la capacidad y performance del sistema. en el presente estudio se ha contemplado la probabilidad de latencia en arribos tal como

se define en (Ramírez Díaz et al. 2017), por otra parte; al plantearse horas programadas para los vuelos de partida, se incluyó una probabilidad de latencia en partidas, que varía de 0 a 20 minutos con la ley de distribución observada en la siguiente figura, dicha ley se basa en las demoras habituales que se pueden generar en los procesos en el área terminal o retrasos en servicios en plataforma los cuales se gestionan como tiempos de buffer.

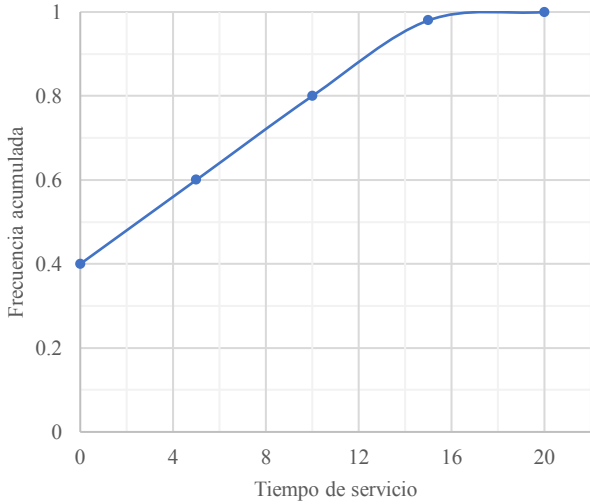


Fig. 5: Distribución de latencia en partida

Modelo SIMMOD

El software SIMMOD, consiste en un modelo de simulación de eventos discretos el cual permite estudiar la dinámica del campo de vuelo, las rutas del espacio aéreo, las operaciones de taxeo, las secuencias de las colas de partida, entre otros eventos relacionados con la capacidad del sistema y la demora asociada a este. El software permite cuantificar la demora en base a las reglas operacionales condicionales incluidas en el modelo, las cuales especifican las acciones a ser tomadas por la simulación en base al estado del sistema.

La demora es computada como la diferencia entre el tiempo de entrada y el tiempo de salida de la cola de cada proceso que cada aeronave lleva a cabo.

La construcción del modelo en SIMMOD requiere que se especifiquen inputs y restricciones, los principales datos de entrada que afectan a la capacidad del sistema son listados a continuación.

- Separación entre aeronaves en tierra 100 m.
- Velocidad de taxeo en calle de rodaje paralela (Alfa) 20 km/h.
- Velocidad de taxeo en calle de rodaje en plataforma (Bravo, Charlie, Delta, Eco, Foxtrot) 10 km/h.
- Velocidad de acceso a puesto 5 km/h.
- Velocidad de pushback 4 km/h.

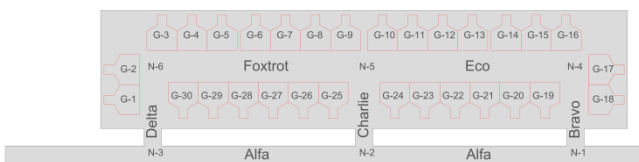


Fig. 6: Designación de calles de rodaje

La construcción del modelo implica definir las reglas de taxeo en ingreso y salida de plataforma, se especifican los nodos N1 a N6 para la toma de decisión, por ejemplo; en el nodo N1 se evalúa si el rodaje primario correspondiente a esa puerta se encuentra libre de conflictos, en caso afirmativo se procede con el rodaje, en caso negativo se aplican las reglas de resolución de conflictos en intersecciones.

Algunas de las reglas de resolución de conflictos se ejemplifican en la siguiente figura. En donde se puede observar la evaluación de conveniencia para emplear un rodaje secundario o esperar a que se libere el rodaje primario, optando por la alternativa que minimice los tiempos espera. Si la puerta asignada se encuentra ocupada, se asigna una puerta alternativa y se repite el proceso de toma de decisión.

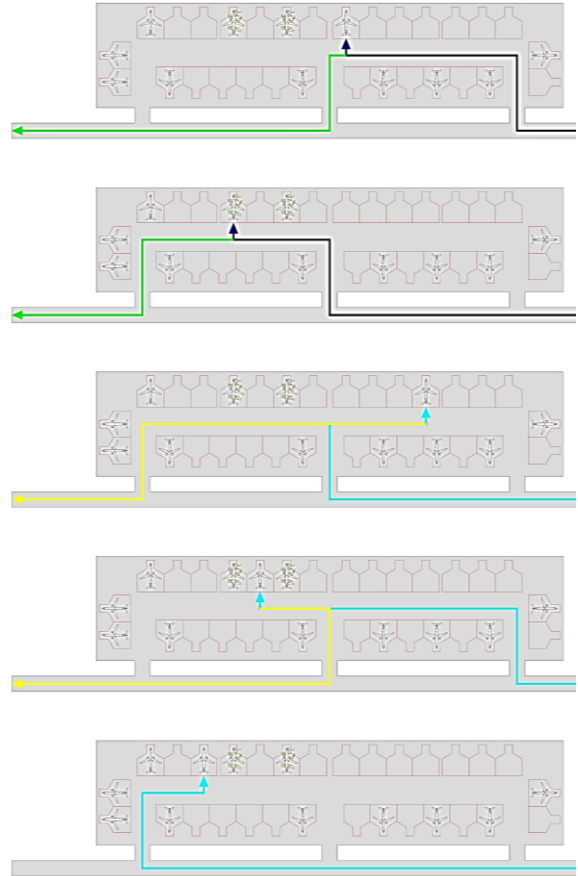


Fig. 7: Esquema de plataforma, sentido de circulación predominante

En el caso de conflictos en rodaje, tal como se observa en la figura a continuación, se da prioridad a la aeronave en proceso de partida, a fin de liberar el nivel de congestión de la plataforma.

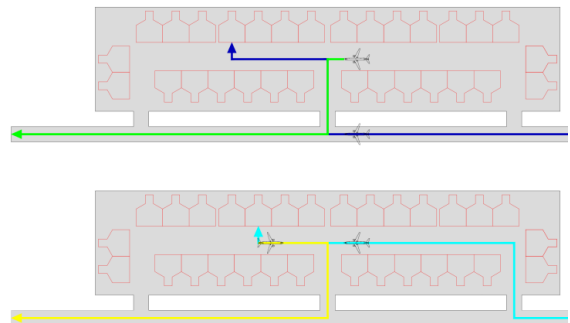


Fig. 8: Conflictos en rodajes

En caso de presentarse demoras en la cola de partidas, las aeronaves absorben la demora en puerta, siempre y cuando haya posiciones libres.

Escenarios

Los escenarios son caracterizados por la política de asignación de puestos de estacionamiento y la condición de demanda como función del número de operaciones hora.

La política de asignación de posiciones de estacionamiento responde al uso exclusivo o no exclusivo de la puesto por parte de una línea aérea. En el presente estudio se modelaron 7 configuraciones de uso de puestos, en donde sobre cada configuración se simularon 4 condiciones de demanda, a su vez, cada condición de demanda, considera 3 porcentajes de participación de la línea aérea con prioridad para el uso de puertas, dando lugar a un total de 76 escenarios, cada uno sometido a 20 iteraciones.

Las combinaciones de escenarios se listan a continuación en función de las variables que lo definen: factor de demanda (FD), porcentaje de puestos de uso exclusivo ($\%PE$), porcentaje de aeronaves con acceso a puestos prioritarios ($\%AAP_{Pr}$).

$$FD = \frac{2 \cdot MAT}{FHA \cdot PTE} \quad (1)$$

$$\%PE = \frac{PUE}{PTE} \quad (2)$$

$$\%AAP_{Pr} = \frac{AC_{Pr}}{MAT} \quad (3)$$

MAT : Movimientos de Arribos Totales

FHA : Franja Horaria de Arribos

PTE : Puestos Totales de Estacionamiento

PUE : Puestos de Uso Exclusivo

AC_{Pr} : Aeronaves con prioridad

TABLA 1: VARIABLES Y VALORES ASIGNADOS EN LA SIMULACIÓN

Variables	Valores simulados
FD	0.40, 0.65, 0.80, 0.88
$\%PE$	0, 6/30, 10/30, 15/30, 17/30, 20/30, 23/30
$\%AAP_{Pr}$	35%, 50%, 65%

Modelo GSE

El modelo para caracterizar la operación (circulación y servicio) de los GSE, se encuentra descrito detalladamente en (Trujillo et al. 2018; Sznajderman et al. 2016). en el presente estudio se consideró que:

- El servicio de handling es brindado por un único proveedor.
- Los servicios requeridos por las aeronaves, corresponden a vuelo regular, Origen-Destino.
- El servicio brindado distingue si es con uso de pasarela de embarque o no.
- Los tiempos de servicio corresponde a tiempos representativos del Boeing 737/700/800 y el A320-200 según corresponda, los cuales son obtenidos del Airplane Characteristics for Airport Planning respectivo.

Calculo de Emisiones

El cálculo de emisiones de las aeronaves y GSE se basó en el método propuesto por (International Civil Aviation Organization (ICAO) 2011), los factores de emisión asociados al modo operativo de la aeronave se obtienen de la base de datos (International Civil Aviation Organization (ICAO) 2017) y los factores de emisión de los GSE se obtienen de la base de datos de la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA), la cual se encuentra avalada por la Comité de Protección Ambiental de Aviación (CAEP)

La expresión general para el cálculo de emisiones de las aeronaves está dada por:

$$Ei_j = \sum (TIM_{jk} \cdot 60) \cdot (FF_{jk}) \cdot (Ei_{ijk}) \cdot (Ne_j) \quad (4)$$

Dónde,

Ei_j : Emisión total del contaminante i (por ejemplo, NO_x , CO o HC), en gramos producido por la aeronave tipo j en un ciclo LTO ajustado.

Ei_{ijk} : índice de emisiones para el contaminante i , en gramos por kg de combustible [$g/(kg \text{ de combustible})$] en el modo k (por ejemplo, despegue, ascenso, descenso, aproximación y taxeo) para cada motor usado por la aeronave tipo j .

FF_{jk} : Flujo de combustible para el modo k , en kilogramos por segundo [kg/s], para cada motor usado por la aeronave tipo j .

TIM_{jk} : Tiempo en el modo para el modo k , en minutos, por la aeronave tipo j .

Ne_j : Numero de motores usado por la aeronave tipo j .

En el presente estudio el TIM_k corresponde al tiempo de rodaje y demoras producidas en el complejo plataforma-puertas y su rodaje asociado.

La expresión general para el cálculo de emisiones producto de la circulación del vehículo GSE para un determinado contaminante está dada por:

$$E_{i,l} = P_l \cdot FE_{i,l} \cdot f_{c_l} \cdot f_{d_l} \cdot \frac{1}{Vel_l} \cdot d_l \quad (5)$$

Dónde,

$E_{i,l}$: Emisión gaseosa del contaminante ' i ', respecto del equipo GSE ' l '. [g] ó [kg]

P_l : Potencia al freno del equipo GSE ' l ', unidades [HP]

$FE_{i,l}$: Factor de emisión del contaminante ' i ', respecto del equipo GSE ' l ', unidades $\left[\frac{g}{HP \cdot h}\right]$ ó $\left[\frac{kg}{HP \cdot h}\right]$.

f_{c_l} : Factor de carga del equipo GSE ' l ', adimensional.

f_{d_l} : Factor de deterioro del equipo GSE ' l ', adimensional.

Vel_l : Velocidad de circulación en plataforma del equipo GSE ' l ', unidades $\left[\frac{km}{h}\right]$.

d_l : distancia de traslado del equipo ' l ', unidades [km].

La expresión general para el cálculo de emisiones producto del servicio del vehículo GSE para un determinado contaminante está dada por:

$$E_{i,l} = P_l \cdot FE_{i,l} \cdot f_{d_l} \cdot \sum_{j=1}^8 (f_{c_j} \cdot t_j)_i \quad (6)$$

Dónde,

$E_{i,l}$: Emisión gaseosa del contaminante 'i', respecto del equipo GSE 'l'. $[g]$ ó $[kg]$

P_i : Potencia al freno del equipo GSE 'i', unidades $[HP]$

$FE_{i,l}$: Factor de emisión del contaminante 'i', respecto del equipo GSE 'l', unidades $\left[\frac{g}{HP.h}\right]$ ó $\left[\frac{kg}{HP.h}\right]$.

f_{c_j} : Factor de carga del equipo GSE por cada tiempo discretizado 'j', según operación de carga y descarga, adimensional.

f_{d_l} : Factor de deterioro del equipo GSE 'l', adimensional.

t_j : Tiempos de los GSE en la espera, conexión, servicio y desconexión para la carga y descarga, en unidades $[hs]$.

A los fines del presente estudio, tal como se menciona previamente, se consideraron los contaminantes NOx y CO.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En relación al Modelo 1, se obtuvieron los tiempos de rodaje y demoras asociadas, discriminadas en el proceso de arribo y partidas para cada uno de los 76 escenarios. En el caso de los tiempos de rodaje no se presentaron variaciones significativas entre los escenarios, motivo por el cual la gráfica a continuación presenta únicamente la demora total (arribo+partida) generada en cada escenario.

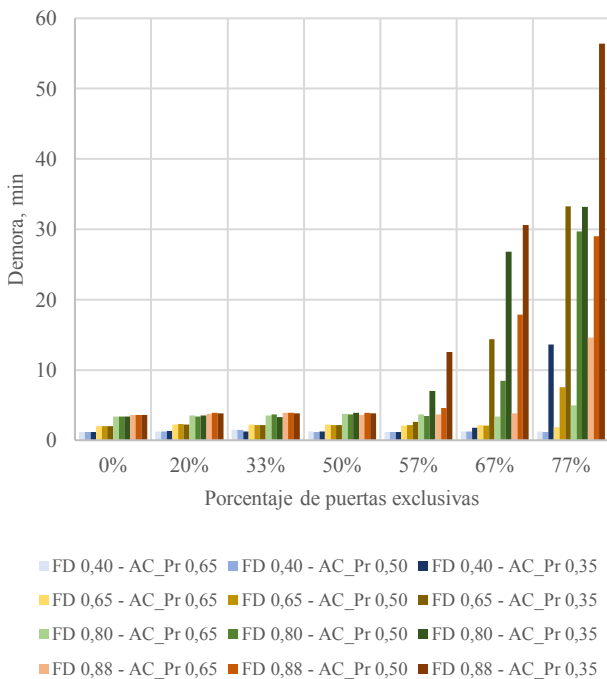


Fig. 9: Demora por escenario

Como se observa en la figura anterior, el aumento en la demora es producido por el efecto de tres parámetros sobre la performance del sistema: factor de demanda (FD), porcentaje de puestos de uso exclusivo ($\%PE$), porcentaje de aeronaves con acceso a puestos prioritarios ($\%AAP_{Pr}$).

En la figura anterior se observa que, para una misma condición de $\%PE$, la demora total del sistema incrementa con el aumento de FD , es decir; con el aumento de la demanda.

Por otra parte, se observa que para un mismo FD , la demora total presenta un comportamiento con dos zonas características, una primera zona en la cual la demora presenta un comportamiento estabilizado a medida que aumenta el $\%PE$, y una segunda zona a partir de un $\%PE$ variable con el FD , a partir del cual, la demora total presenta un marcado aumento, el aumento es inversamente proporcional al $\%AAP_{Pr}$.

En consecuencia, es posible concluir que la capacidad del complejo plataforma-puertas es función de las características de la demanda y el modelo de gestión de la infraestructura. Por lo tanto, es posible considerar la existencia de un punto óptimo en función de la combinación de las distintas variables: FD , $\%AAP_{Pr}$ y el $\%PE$.

Con el objeto de evidenciar el efecto de la política de asignación de puertas, sobre las emisiones y la contribución de las aeronaves y los GSE, a continuación, se presenta los resultados obtenido para un FD de 0.80, para ocho escenarios, los cuales se resumen en la tabla a continuación.

TABLA 1: ESCENARIOS

Escenario	Aeronaves con acceso a puestos prioritarios ($\%AAP_{Pr}$)	Puestos de uso exclusivo ($\%PE$),
1	67%	57%
2	67%	67%
3	50%	57%
4	33%	57%
5	67%	77%
6	50%	67%
7	50%	77%
8	33%	67%

En la figura a continuación se observa que el aporte contaminante se ve influenciado por la política de asignación de puertas empleado.

Las emisiones totales generadas pueden incrementar hasta en un 300% a raíz de la combinación entre las variables que caracterizan a la demanda. En este sentido se observa que las emisiones aumentan siguiendo un comportamiento proporcional a la relación presentada a continuación (la cual no se demuestra en el presente estudio).

$$\%PE^2 \cdot (1 - \%AAP_{Pr}) \cdot FD \quad (7)$$

El aporte contaminante de los procesos asociados a los GSE (circulación y servicio) no presenta variaciones significativas producto de la política de asignación de puertas.

El aporte contaminante asociado a las demoras presenta variaciones significativas conforme varía la política de asignación de puertas, en tanto que, el aporte contaminante asociado al movimiento de las aeronaves, si bien presenta variaciones; dichas variaciones son despreciables en comparación con las producidas por las demoras.

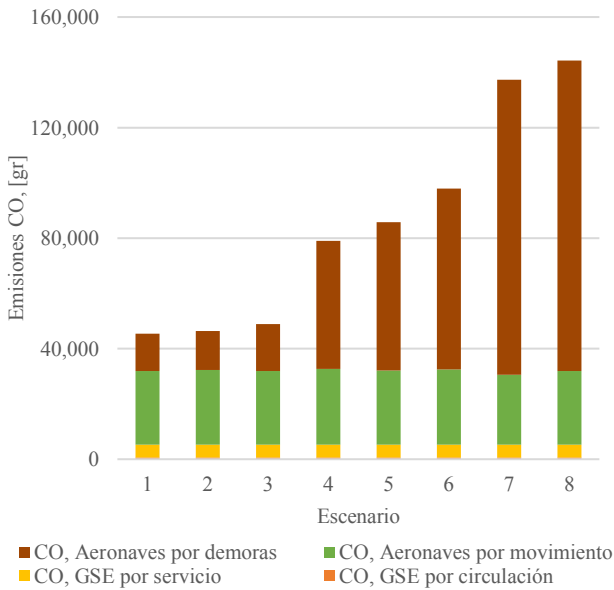


Fig. 10: Emisiones de CO por grupo y proceso

En la siguiente figura se observa que la incidencia de las emisiones de CO de los GSE (circulación + servicio) varía entre 4 y 12% según la política de asignación de puertas.

En tanto que la incidencia de las emisiones de CO de las aeronaves asociadas al proceso demora y movimientos, presentan una relación que varía de 30/59 a 78/18% dentro del total de emisiones.

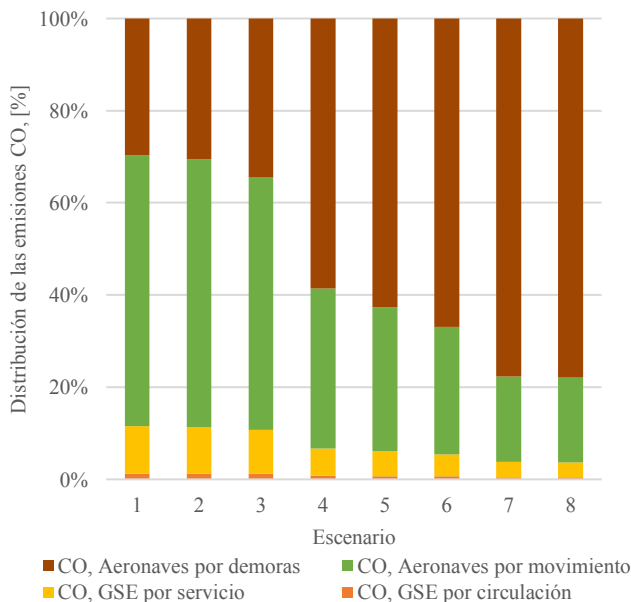


Fig. 11: Incidencia en las emisiones de CO por grupo y proceso

En relación a las emisiones de NO_x, el comportamiento en respecto de las emisiones totales resulta similar al visto previamente para el CO. Sin embargo, se observa que la incidencia de los vehículos de GSE cobra mayor relevancia.

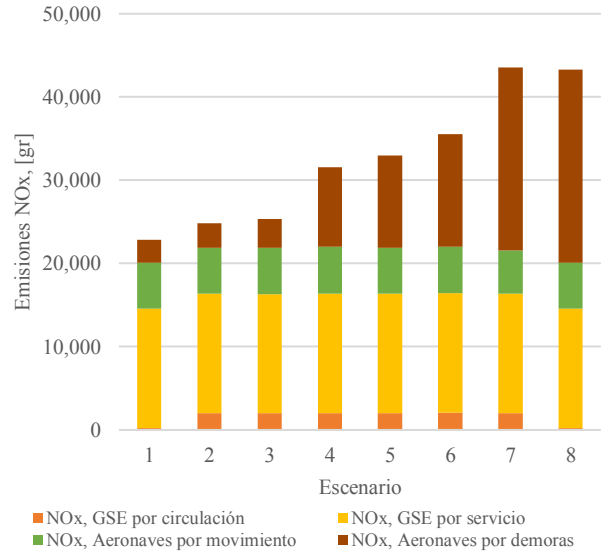


Fig. 12: Emisiones de NOx por grupo y proceso

En la siguiente figura se observa que la incidencia de las emisiones de NO_x de los GSE (circulación + servicio) varía entre 34 y 66% según la política de asignación de puertas.

En tanto que la incidencia de las emisiones de NO_x de las aeronaves asociadas al proceso demora y movimientos, presentan una relación que varía de 12/24 a 54/13% dentro del total de emisiones.

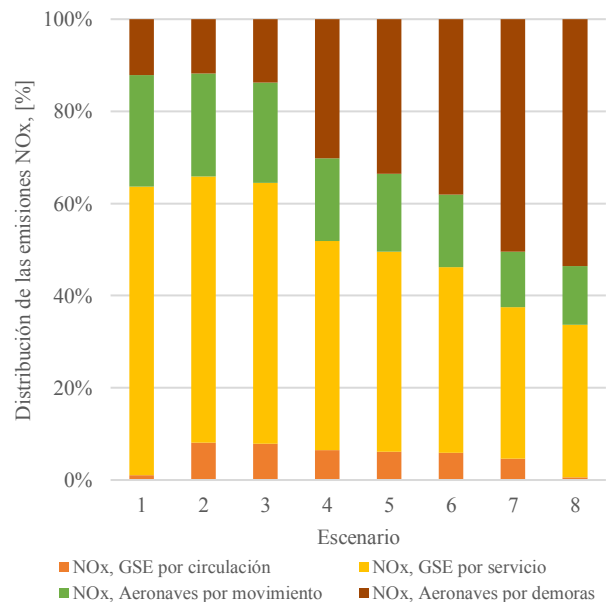


Fig. 13: Incidencia en las emisiones de NOx por grupo y proceso

Por otra parte, cada escenario y en consecuencia cada política de asignación de slot, da lugar a un requerimiento distinto de vehículos y por ende de kilómetros recorridos por vehículo. En la siguiente figura, se observa que la cantidad de vehículos varía con el escenario bajo análisis, no obstante, dicha variación no presenta un comportamiento proporcional con las variables empleadas en la caracterizan de la demanda (%AAPP_r y %PE).

En las siguientes figuras se clasifican los GSE en función de ordenes de magnitud similares en cuanto cantidad de vehículos requeridos.

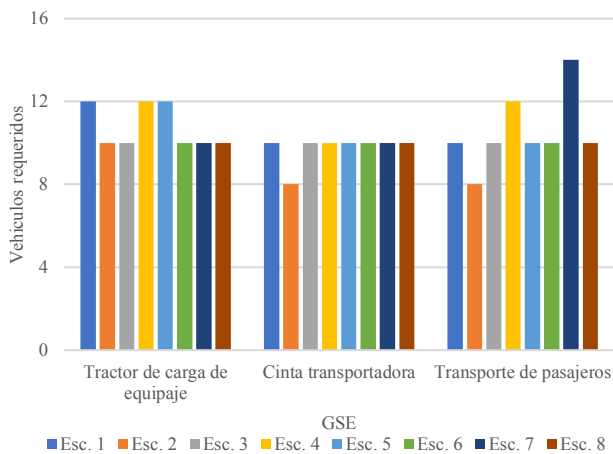


Fig. 14: Cantidad de vehículos requeridos por grupo de GSE según escenarios modelados

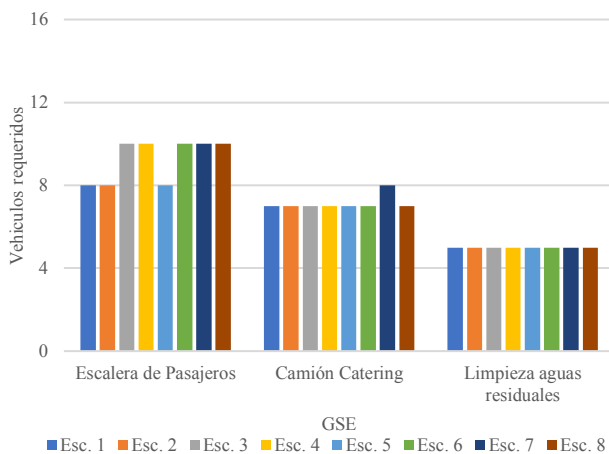


Fig. 15: Cantidad de vehículos requeridos por grupo de GSE según escenarios modelados (cont.)

De la figura 14 y 15, salvo el GSE asociado al transporte de pasajeros, la cantidad de vehículos requeridos presenta un comportamiento estable, con un rango de variación entorno de su valor medio de +/- 1 vehículo (aprox. +/- 10%), en estos casos, se observa que, dado el número de vehículos en circulación, la inclusión no se evidencia como un aumento significativo del total de vehículos requeridos.

En los casos donde el número de vehículos de GSE en circulación son bajos, la inclusión de un nuevo vehículo repercute significativamente en la capacidad de respuesta del sistema, al mismo tiempo que la inclusión se evidencia en términos relativos. Asimismo, se observa que solo en el caso del vehículo de remolque de aeronaves existe un comportamiento correlacionado con las variables empleadas en la caracterizan de la demanda.

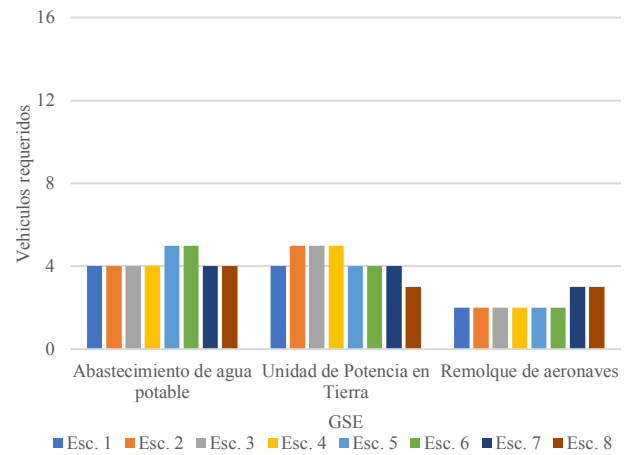


Fig. 16: Cantidad de vehículos requeridos por grupo de GSE según escenarios modelados (cont.)

De modo similar, ocurre respecto de los kilómetros recorridos por aeronave, ninguno de los GSE presenta un comportamiento directamente dependiente de las variables empleadas en la caracterización de la demanda. No obstante, el rango de variación de kilómetros recorridos es significativo.

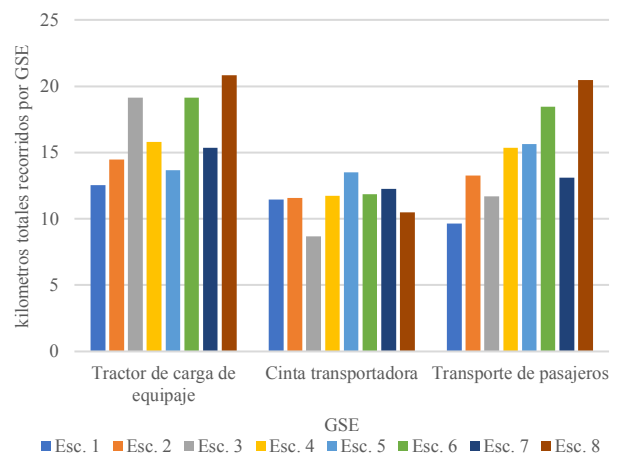


Fig. 17: Kilómetros totales recorridos por vehículo

En la figura 17 se observa que la variación en kilómetros requeridos puede ser hasta dos veces mayor (ver caso de GSE para transporte de pasajeros Esc. 1 vs Esc. 8).

Por otra parte, tal como se observa en la figura 18 y 19, en las que se presentan servicios que requieren menor cantidad de vehículos de GSE, se observa que el total de kilómetros recorridos presenta un comportamiento de mayor estabilidad entre escenarios.

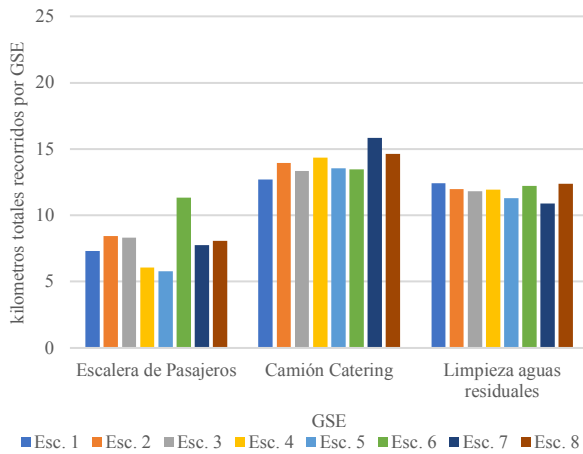


Fig. 18: Kilómetros totales recorridos por vehículo (cont.)

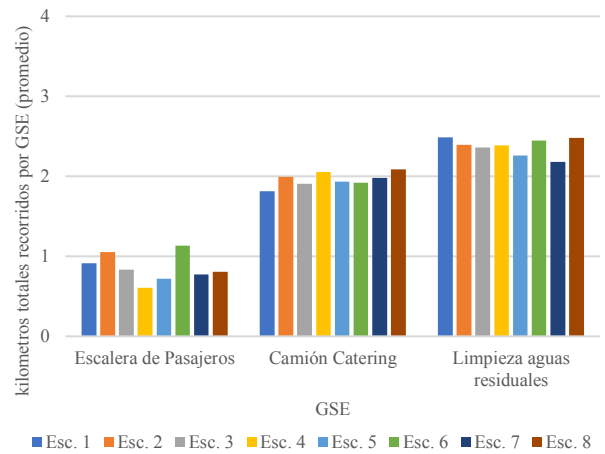


Fig. 22: Kilómetros promedio recorridos por vehículo (cont.)

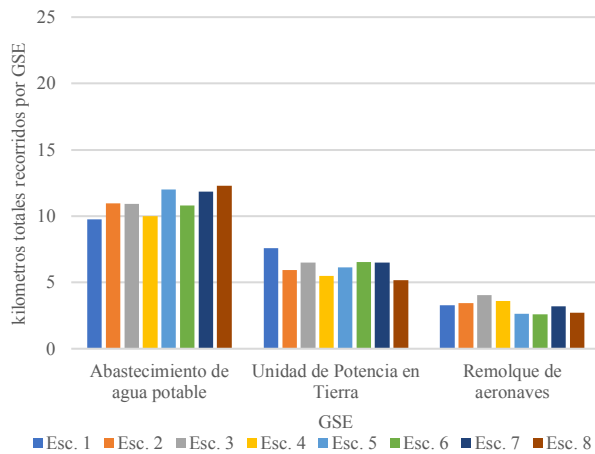


Fig. 19: Kilómetros totales recorridos por vehículo (cont.)

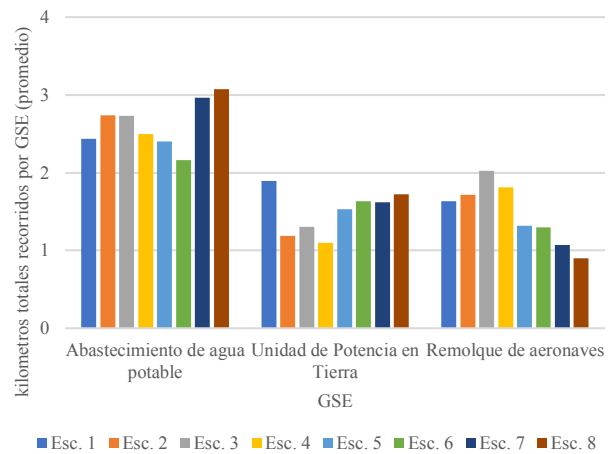


Fig. 23: Kilómetros promedio recorridos por vehículo (cont.)

Si se analiza la relación entre kilómetros totales recorridos por vehículo para cada escenario, se observa que existe una variación significativa entre escenarios (con excepción del servicio de catering y el de limpieza de aguas residuales), no obstante, dicha variación no presenta relación con las variables empleadas en la caracterizan de la demanda:

Por su característica particular, el servicio de combustible se presenta por separado dado que la distancia al puesto de estacionamiento asignado a este tipo de vehículos presenta variaciones significativas según la configuración del aeropuerto.

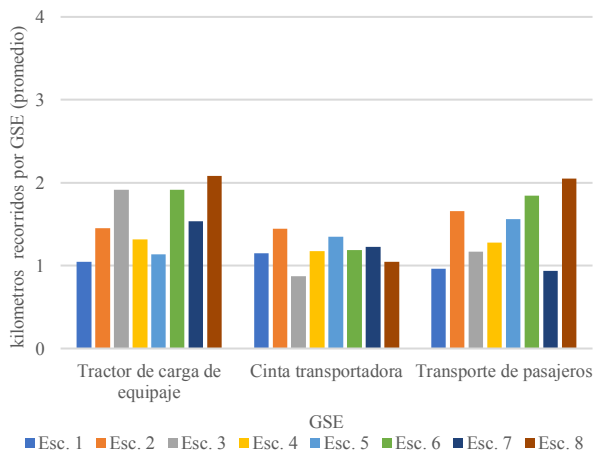


Fig. 20: Kilómetros promedio recorridos por vehículo

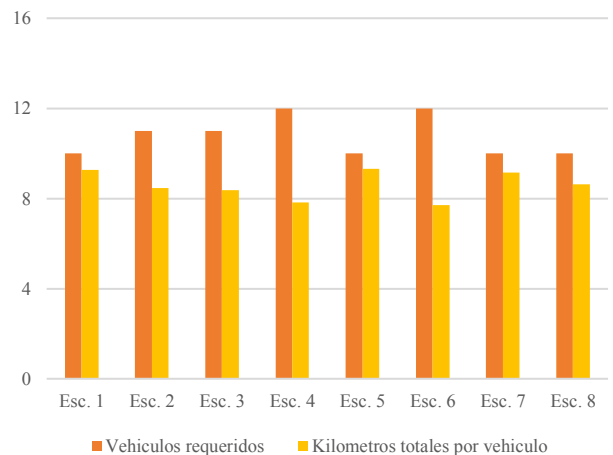


Fig. 24: Camión cisterna, número de vehículos y kilometro recorridos por vehículo

CONCLUSIONES

Es posible concluir que la capacidad del complejo plataforma-puestos de estacionamiento es función de las características de la demanda y el modelo de gestión de la infraestructura. Por lo tanto, la existencia de un punto óptimo es función de la combinación de las distintas variables: FD , $\%AAP_{Pr}$ y el $\%PE$.

Las emisiones totales generadas pueden incrementar hasta un 300% a raíz de la combinación entre las variables que caracterizan a la demanda.

Las emisiones de CO y NO_x asociadas a las aeronaves se clasificaron en emisiones por movimiento y demora, para condiciones en que la relación de:

$$\%PE^2 \cdot (1 - \%AAP_{Pr}) \cdot FD \quad (7)$$

Si la ecuación anterior presenta valores bajos, el principal aporte de emisiones se relaciona al movimiento de las aeronaves, mientras que, a medida que aumenta predominan las emisiones originadas por la demora, a raíz de la saturación de la plataforma ya sea por condiciones directamente vinculadas al FD (número de operaciones hora) o por condiciones asociadas a la política de asignación de puestos ($\%PE$) según operador aeroportuario.

La incidencia de las emisiones de CO de los GSE (circulación + servicio) varía entre 4 y 12%; mientras que, la del NO_x varía entre 34 y 66% según la política de asignación de puertas.

La contribución a las emisiones por parte de las aeronaves presenta dos componentes: demora y movimiento, la incidencia de ellas presenta variaciones según el escenario analizado. Para el CO se observa que la demora incide entre 30 y 78% mientras que los movimientos contribuyen en 59 y 18% respectivamente. En cuanto al NO_x el aporte por demoras va desde 12 a 54% y por movimientos de 24 a 13% respectivamente.

En relación a las emisiones de los GSE, las emisiones de CO por servicio representan el 88%, en tanto que las emisiones de NO_x varían entre el 88% y el 98% según la política de asignación de puertas, cobrando una mayor incidencia las emisiones por circulación.

La política de asignación de puestos, a nivel general, influye en el número de vehículos de GSE requeridos y los kilómetros totales recorridos por ellos, sin embargo; para los escenarios analizados no se detecta una correlación entre estos aspectos (número de vehículos y kilómetros) y las variables empleadas en la caracterización de la demanda.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por el financiamiento mediante una Beca Doctoral de Postgrado tipo I al Ing. Gabriel Alberto Ramírez Díaz.

Se agradece a la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC) de la Provincia de Buenos Aires por el financiamiento mediante una Beca Doctoral al Ing. Lucas Sznajderman N° 2018-207-GDEBA-CICMCTI.

REFERENCIAS

Bandara, S. & Wirasinghe, S., 1989. Airport gate position estimation under uncertainty. *Transportation Research Record: Journal of the*

Transportation Research Board, 1199(1), pp.41–48.

- Bandara, S. & Wirasinghe, S.C., 1992. Walking distance minimization for airport terminal configurations. *Transportation Research Part A*, 26(1), pp.59–74.
- Carpenter, M. & Stroiney, S., 2012. Managing gate and ramp operations to reduce delay, fuel burn, and costs. *ICNS 2012: Bridging CNS and ATM - Conference Proceedings*, pp.1–22.
- Deng, W. et al., 2018. Study on an airport gate assignment method based on improved ACO algorithm. *Kybernetes*, 47(1), pp.20–43.
- Eurocontrol, 2013. Challenges of Growth 2013 - Task 4: European Air Traffic in 2035. *Network Manager nominated by the European Commission*, pp.1–64. Available at: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/official-documents/reports/201307-challenges-of-growth-summary-report.pdf>
- Ferrulli, P., 2016. Green Airport Design Evaluation (GrADE) - Methods and Tools Improving Infrastructure Planning. *Transportation Research Procedia*, 14, pp.3781–3790. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.463>.
- Guclu, O.E. & Cetek, C., 2017. Analysis of aircraft ground traffic flow and gate utilisation using a hybrid dynamic gate and taxiway assignment algorithm. *Aeronautical Journal*, 121(1240), pp.721–745.
- Hassounah, M.I. & Steuart, G.N., 1993. Demand for Aircraft Gates. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1423, pp.26–33.
- International Civil Aviation Organization (ICAO), 2011. *Airport air quality manual*. Available at: http://www.icao.int/publications/Documents/9889_cons_en.pdf.
- International Civil Aviation Organization (ICAO), 2017. *edb-emissions-databank v23c*.
- Janic, M., 2016. Analyzing, modeling, and assessing the performances of land use by airports. *International Journal of Sustainable Transportation*, 10(8), pp.683–702. Available at: <http://dx.doi.org/10.1080/15568318.2015.1104566>.
- Kim, S., Feron, E. & Clarke, J., 2009. Assigning gates by resolving physical conflicts. ... , and *Control Conference*, no. AIAA-2009- ..., (August). Available at: <http://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2009-5648>.
- Kuzu, S.L., 2017. Estimation and dispersion modeling of landing and take-off (LTO) cycle emissions from Atatürk International Airport.
- Mirković, B. & Tosić, V., 2011. Airport apron capacity: estimation, representation, and flexibility. *Journal of Advanced Transportation*, 47(June 2010), pp.512–525. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/atr.144/full>.
- Mirković, B. & Tošić, V., 2017. The difference between hub and non-hub airports – An airside capacity perspective. *Journal of Air Transport Management*, 62, pp.121–128.
- Mota, M.M. et al., 2017. Simulation-based turnaround evaluation for Lelystad Airport. *Journal of Air Transport Management*, 64, pp.21–32. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2017.06.021>.
- Mota, M.M. et al., 2018. Simulation-based Virtual Cycle for Multi-level Airport Analysis. , pp.1–16.
- Ramírez-Díaz, G. et al., 2017a. Estudio de capacidad del concepto de plataforma espigón: Dimensión operacional y ambiental. In *VI Congreso Internacional de la Red Iberoamericana de Investigación en Transporte Aéreo*. Santiago de Chile, p. 16.
- Ramírez-Díaz, G. et al., 2017b. Estudio de capacidad mediante simulación: Interacción plataforma-calle de rodaje. In *VI Congreso Internacional de la Red Iberoamericana de Investigación en Transporte Aéreo*. p. 15.
- Ramírez-Díaz, G., Piechocki, J. & Di Bernardi, A., 2016. Análisis y diseño de una plataforma comercial aeroportuaria: Dimensión operacional y ambiental. In *4to Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica*. p. 12.
- Ramírez Díaz, G., Piechocki, J. & Di Bernardi, A., 2017. Capacidad aeroportuaria: Estudio de la influencia de las variables aleatorias sobre el lado aire mediante el uso de simulaciones computacionales. In *4º Jornadas ITE - 2017 - Facultad de Ingeniería - UNLP*. La Plata, Buenos Aires, pp. 127–135.
- Simaiakis, I. & Balakrishnan, H., 2009. Queuing Models of Airport Departure Processes for Emissions Reduction. *AIAA Guidance*,

5° Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica - CAIA 2018

Navigation, and Control Conference, (August), pp.1–26. Available at: <http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2009-5650>.

- Simonetti, I., Maltagliati, S. & Manfrida, G., 2015. Air quality impact of a middle size airport within an urban context through EDMS simulation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 40, pp.144–154. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2015.07.008>.
- Steuart, G.N., 1974. Gate Position Requirements at Metropolitan Airports. *Transportation Science*, 8(2), pp.169–189. Available at: <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/trsc.8.2.169>.
- Sznajderman, L. et al., 2016. Simulación del aporte contaminante gaseoso de CO y NOx por operación de los GSE en el Aeropuerto Internacional de Ezeiza. In *4to Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica*. p. 12.
- Trujillo, C. et al., 2018. *Estudio del Aporte Contaminante Gaseoso Generado por la Circulación de los Vehículos de Apoyo en Tierra (GSE) en Emplazamientos Aeroportuarios.*,
- Wing, A.K., Felder, W.N. & Cloutier, R.J., 2015. Modeling a Ramp Area Support System. In *15th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics. Available at: <http://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2015-3186>.
- Winther, M. et al., 2015. Emissions of NOx, particle mass and particle numbers from aircraft main engines, APU's and handling equipment at Copenhagen Airport. *Atmospheric Environment*, 100(x), pp.218–229. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.10.045>.
- Wirasinghe, S.C. & Bandara, S., 1990. Airport gate position estimation for minimum total costs -Approximate closed form solution. *Transportation Research Part B: Methodological*, 24(4), pp.287–297. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/019126159090003H>.
- Yılmaz, İ., 2017. Emissions from passenger aircrafts at Kayseri Airport, Turkey. *Journal of Air Transport Management*, 58, pp.176–182.