



Universitat
Autònoma
de Barcelona



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE
BARCELONA

5512 - GESTIÓN DE RECURSOS DE HANDLING EN
AEROPUERTOS CONGESTIONADOS

TRABAJO FINAL DE GRADO

Grado: Gestión Aeronáutica

Autor: Alejandro Agustí Chávez

Tutor: Juan José Ramos González

Directora: Liana Napalkova

Escola d'Enginyeria

Sabadell, Julio de 2013

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS	6
RESUMEN	7
1. INTRODUCCIÓN	8
1.1 Motivación	8
1.2 Objetivo y tareas del trabajo	8
1.3 Novedad	9
1.4 Valor práctico	9
1.5 Metodología	9
1.6 Estructura del trabajo	10
2. ASISTENCIA EN TIERRA EN AEROPUERTOS CONGESTIONADOS	11
2.1 Servicios de handling	12
2.1.1 Servicios al pasajero	12
2.1.2 Servicios a la aeronave	15
2.2 Características del handling en aeropuertos congestionados	20
2.3 Importancia de la programación de la asistencia en tierra	21
2.4 Conclusiones	23
3. ANÁLISIS DE MÉTODOS Y SOFTWARE EXISTENTES DE PROGRAMACIÓN DE LA ASISTENCIA EN TIERRA	25
3.1 Análisis de métodos	25

3.1.1 Especificación de la clasificación de parámetros.....	25
3.1.2 Análisis de métodos sujeto a la clasificación de parámetros.....	26
3.2 Análisis de software para “Ground Handling Scheduling”.....	39
3.3 Conclusiones.....	51
4. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE LA PROGRAMACIÓN DE LA ASISTENCIA EN TIERRA.....	52
4.1 Supuestos a considerar.....	53
4.2 Funciones objetivo.....	53
4.3 Variables de decisión.....	54
4.4 Restricciones.....	54
4.5 Conclusiones.....	54
5. DESARROLLO DEL MODELO DE SIMULACIÓN DE LA ASISTENCIA EN TIERRA.....	55
5.1 Tipo de escala.....	55
5.2 “Flowchart” del modelo.....	58
5.3 Modelo de simulación con SIMIO.....	62
5.4 Conclusiones.....	65
6. INTEGRACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN CON “GROUNDHRS”.....	66
6.1 Estructura del software.....	66
6.2 Base de datos MySQL.....	67
6.3 Optimizador basado en los algoritmos evolutivos multi-objetivo.....	69
6.4 Interfaz gráfica de usuario de “groundHRS”.....	72
6.5 Conclusiones.....	74

7. CASOS DE ESTUDIO75

 7.1 Caso de estudio 175

 7.2 Caso de estudio 276

 7.3 Caso de estudio 378

 7.4 Conclusiones79

8. RESULTADOS Y CONCLUSIONES80

AGRADECIMIENTOS82

REFERENCIAS83

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1: Carga de ULD's	16
FIGURA 2.2: Proceso de deshielo.....	17
FIGURA 2.3: Gategourmet, empresa de catering.....	18
FIGURA 2.4: Dispensador de CHL.....	19
FIGURA 2.5: Ground Power Unit y tractor de remolque.....	19
FIGURA 2.6: Diagrama de Gantt de una escala.....	22
FIGURA 3.1: Representación de una red neuronal.....	33
FIGURA 3.2: Ejemplo de red AoN.....	38
FIGURA 5.1: Escala de la aeronave.....	56
FIGURA 5.2: Relación de las actividades que componen la escala de la aeronave.....	57
FIGURA 5.3: "Flowchart" del modelo.....	61
FIGURA 5.4: Disposición de la terminal T2 del aeropuerto de Barcelona.....	62
FIGURA 5.5: Servers en la escala.....	63
FIGURA 5.6: Ejemplo de la escala de una aeronave de tipo "medium".....	63
FIGURA 5.7: Ejemplo de estados de información.....	64
FIGURA 5.8: Procesos.....	64
FIGURA 5.9: Estados.....	64
FIGURA 5.10: Ejemplo de <i>push-back</i>	65
FIGURA 6.1: Beneficios del software.....	66
FIGURA 6.2: Esquema general del "groundHRS".....	67
FIGURA 6.3: Diagrama EER de la BBD MySQL.....	68

FIGURA 6.4: Interfaz gráfica de usuario72

FIGURA 6.5: Ejemplo de la programación de los equipos de handling.....73

FIGURA 6.6: Histograma de precocidad.....73

FIGURA 6.7: Histograma de ocupación de rampa.....73

FIGURA 7.1: Objetivo de casos de estudio.....75

FIGURA 7.2: Evolución de los resultados del caso de estudio 1.....76

FIGURA 7.3: Evolución de los resultados del caso de estudio 2.....77

FIGURA 7.4: Evolución de los resultados del caso de estudio 3.....78

FIGURA 8.1: Diagrama de Gantt obtenido tras la simulación.....80

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3.1: Parámetros.....	26
TABLA 3.2: Taxonomía.....	26
TABLA 5.1: Tiempos de ejecución.....	58
TABLA 7.1: Desviación total de los tiempos de handling inicialmente programados.....	76
TABLA 7.2: Tiempo de inactividad de los equipos de handling.....	77
TABLA 7.3: Desviación total de la duración de los servicios de handling.....	78

RESUMEN

En el presente trabajo se estudia el problema de la programación de los servicios de handling en aeropuertos congestionados, donde el riesgo de propagación de errores es bastante elevado.

Para ello, la empresa Aslogic ha desarrollado una herramienta de optimización capaz de encontrar una programación de los recursos factible y óptima, y cuya solución, al tener en consideración una serie de restricciones e incertidumbres, otorga flexibilidad y ventaja competitiva para compañías aéreas y agentes de handling.

Así pues, con el fin de validar las soluciones proporcionadas por el algoritmo de optimización, se ha diseñado un modelo de simulación en SIMIO, y para su implementación, se han utilizado datos reales de vuelos y se ha intentado conseguir unas operaciones de handling lo más realistas posible.

A continuación, se han realizado una serie de casos de estudio en los que se aplicaban unas determinadas incertidumbres y elementos estocásticos, como llegadas con retraso de aeronaves o variaciones en los tiempos de ejecución de los servicios. Todo ello, con el propósito de analizar el impacto que tienen tales elementos en la programación inicial dada por la herramienta de optimización.

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1 Motivación

El tráfico aéreo está experimentando un notable aumento en todo el mundo, teniendo como consecuencia la congestión de muchos aeropuertos.

La construcción de nuevos aeropuertos o nuevas terminales y plataformas de estacionamiento pueden dar solución a dicho congestionamiento, pero son soluciones sumamente costosas. Es por ello, que mejorando las programaciones de los recursos de handling en dichos aeropuertos está adquiriendo cada vez más relevancia en el sector, pues una programación suficientemente óptima, no solo aumenta la capacidad en los actuales aeropuertos sino que además, puede llegar a reducir considerablemente los costes operativos de los agentes de handling y de las compañías aéreas. Ello se debe a que permite un uso más eficiente de los recursos disponibles, reduciendo los retrasos en las operaciones.

Así pues, en un contexto altamente competitivo, como en el que se encuentra el transporte aéreo, el objetivo de toda aerolínea es la de ser eficiente y competitiva, de tal manera, que se busca maximizar el uso de las propias aeronaves al intentar reducir los tiempos de escala en los aeropuertos y los costes derivados de ello. De ahí, el especial interés que ahí por el estudio y desarrollo de herramientas que puedan aportar soluciones más eficientes, en lo que se refiere a la programación de la asistencia en tierra.

1.2 Objetivo y tareas del trabajo

El objetivo del presente trabajo es el elaborar un modelo de simulación, mediante el cual, se puedan validar las programaciones de los recursos de handling dadas por la herramienta de optimización “*groundHRS*”, desarrollada por la empresa Aslogic, y seleccionar aquella que sea más robusta.

Para ello, las tareas que se llevaron a cabo han sido, primero que nada, un estudio de las operaciones de handling en los aeropuertos y de los métodos y software existentes para la programación de la asistencia en tierra. Posteriormente, se realizó el modelo de simulación en

SIMIO con el que se integraría la herramienta “*groundHRS*”, y mediante el cual, se validaría la solución dada a través de casos de estudio, aplicando toda una serie de incertidumbres que suelen aparecer en las operaciones reales, como por ejemplo, llegadas de aeronaves con retrasos.

1.3 Novedad

La novedad de la aplicación “*groundHRS*” es que permite la programación y reprogramación de los recursos de handling en tiempo real, además de permitir que los agentes de handling consideren toda una serie de factores, como las distancias que deben recorrer los equipos de handling para llegar a las posiciones de parking, los acuerdos de nivel de servicio, el congestionamiento de la rampa, entre otros.

Por otro lado, en caso de cambios, es capaz de actualizarse y programar los recursos una vez más en pocos minutos.

1.4 Valor práctico

Mediante la validación de esta herramienta, compañías aéreas y empresas de handling se pueden beneficiar de una serie de ventajas:

- Programaciones óptimas de los equipos de handling.
- Respuesta rápida a cambios de último momento en las programaciones de vuelo.
- Incremento del cumplimiento de los acuerdos de nivel de servicio.
- Incremento del tiempo de utilización de los equipos de handling.

1.5 Metodología

Para la realización del trabajo, me he tenido que poner en contacto con la empresa Aslogic. Empresa con la que se ha colaborado a lo largo de todo el proyecto, que ha facilitado gran parte de la información aquí presentada, como toda la información referente a la aplicación “*groundHRS*” y gran parte de los datos utilizados durante la simulación, y con la que se ha mantenido un contacto constante, además de diversas entrevistas con Liana Napalkova.

El trabajo se ha diferenciado, básicamente, en dos partes. En una parte de investigación y en una parte práctica. La primera parte se desarrolló durante los dos primeros meses del proyecto, y consta de un estudio sobre las operaciones en los aeropuertos y de los métodos y software existentes para la programación de la asistencia en tierra. En la segunda, en cambio,

se definió el problema a simular de forma matemática y se diseñó el modelo de simulación, que posteriormente sería integrado con la herramienta de optimización. Finalmente, se hicieron una serie de casos de estudio, cuya finalidad era extraer resultados y conclusiones, y poder validar la solución del algoritmo de optimización.

Por otro lado, a lo largo de todo el proyecto, se utilizó el programa *JabRef reference manager*, con el se llevó un mejor control de todas las fuentes de las que se extraía información para el trabajo.

1.6 Estructura del trabajo

El resto del trabajo está organizado de la siguiente manera:

Capítulo 2: Se realiza un estudio sobre la asistencia en tierra en aeropuertos congestionados. En dicho capítulo se analiza las operaciones de handling, las características de los aeropuertos congestionados y la importancia de la programación de los recursos de handling.

Capítulo 3: Se lleva a cabo una taxonomía de los métodos existente para la programación de la asistencia en tierra y un estudio sobre los software.

Capítulo 4: Se define de forma matemática, el problema de la asistencia en tierra a simular.

Capítulo 5: Se define el tipo de escala y sus tiempos de ejecución según el tipo de aeronave, se diseña el “*flowchart*” del modelo y se procede a describir el funcionamiento del modelo de simulación elaborado en SIMIO.

Capítulo 6: Se hace una breve explicación del funcionamiento de la herramienta de optimización, así como su estructura y las tablas de información de donde obtiene la solución.

Capítulo 7: Se realizan una serie de casos de estudio, aplicando una serie de incertidumbres, para poder analizar la solución inicial de la programación y validarla.

Capítulo 8: Se extraen resultados y conclusiones del trabajo.

CAPÍTULO 2

Asistencia en tierra en aeropuertos congestionados

El concepto de “*Handling*” o “asistencia en tierra” hace referencia a todo un conjunto de actividades y servicios que tienen lugar en los aeropuertos, y que tienen como finalidad, llevar a cabo de manera eficiente la carga y descarga de las aeronaves.

Dicho de otra manera, se podría incluir la definición que hace al respecto Mariano Domingo Calvo en “Descubrir el handling aeroportuario” (2005: 11):

“El handling es la prestación de un conjunto determinado de servicios aeroportuarios a las aeronaves, pasajeros, equipajes y mercancías en un aeropuerto y que son necesarios para el intercambio del modo de transporte aéreo al terrestre y viceversa, así como del aéreo al aéreo”.

Ello viene a significar, que todos estos servicios son los responsables de que se pueda, una vez llegados al aeropuerto mediante cualquier medio de transporte terrestre, montar en el avión o bajarse del mismo de manera segura, al igual que cambiar de aeronave, en caso de los pasajeros que vayan de tránsito.

Así pues, la asistencia en tierra de las aeronaves es de vital importancia para lograr una operativa eficiente en los aeropuertos. Sin embargo, son muy variadas y diversas las actividades que componen el handling en los aeropuertos, por lo que la mayoría de las aerolíneas hoy en día deciden externalizar estas prácticas. De ahí que encuentre empresas dedicadas exclusivamente al handling y que presten sus servicios a diversas compañías aéreas.

Estos servicios pueden variar dependiendo del nivel de exigencias de la compañía a la que se le ofrece dicho servicio, así como del tipo de actividad que se haya contratado, ya que existen básicamente tres formas de realizar la asistencia a las aeronaves:

1. **“Auto-handling”**: Es la propia aerolínea la que lleva a cabo sus servicios de handling.
2. **A terceros**: La asistencia en tierra en los aeropuertos es externalizada y la realiza una empresa ajena a la compañía, que puede ser una empresa especializada en el handling aeroportuario u otra compañía aérea.

3. **Handling mixto:** La empresa externaliza únicamente una parte del handling, con lo que los servicios se llevarían a cabo entre la propia aerolínea y otra empresa, como puede ser el caso de externalizar los servicios al pasajero pero los de rampa realizarlos ella misma o viceversa.

2.1 Servicios de handling

2.1.1 Servicios al pasajero

Los servicios al pasajero son todos aquellos que percibe directamente la persona que va a viajar. Estos servicios abarcan desde los procesos de facturación o también conocidos como *check-in*, hasta el desembarque y embarque de las aeronaves.

- **Facturación:** El proceso de *check-in* es el primer punto de contacto entre el pasajero y la aerolínea en los aeropuertos.

Dicho proceso tiene lugar en los mostradores que se encuentran previos a los controles de seguridad del aeropuerto, y son imprescindibles para que el pasajero pueda pasar de la zona tierra a la zona aire, que es donde tienen lugar los embarques.

El proceso consiste básicamente en:

- ✓ Un control de documentación, donde se verifican los documentos de identidad de todos los pasajeros. Dicha parte del proceso puede variar dependiendo del destino y de las políticas de la compañía que opera el vuelo, ya que para determinados destinos se realizan controles más exhaustivos, como por ejemplo, Estados Unidos, con todo y que el control de documentación se repite en los puestos de aduanas del aeropuerto y en la propia puerta de embarque.
- ✓ Verificación del peso del equipaje a facturar y de mano de todos los individuos, velando por el cumplimiento de la normativa de la compañía y teniendo en cuenta las tarifas y las clases (primera clase, Business, turista, etc).
- ✓ Asignación de asientos, cumpliendo con las restricciones que pueda haber al respecto. En determinadas aerolíneas, esta parte del proceso no se lleva a cabo.
- ✓ Facturación del equipaje en sí e impresión de las tarjetas de embarque. Mediante estas tarjetas de embarque el pasajero ya está preparado para acceder a la zona de embarque.

- ✓ Finalmente, el pasajero recibe información con respecto al estado del vuelo y la zona de embarque.

Este proceso es fundamental para las aerolíneas o agentes de handling, ya que de esta manera, se almacena el equipaje a cargar en un vuelo concreto y en el sistema de información figuran todos los pasajeros que se esperan para un determinado avión y si llevan equipaje o no, con lo que se lleva un mejor control de las operaciones.

No obstante, cabe remarcar que las aerolíneas también ofrecen la posibilidad de realizar el *check-in* de manera on-line a través de la página web o a través de máquinas automáticas que se encuentran en los aeropuertos. De esta manera, se intenta reducir los tiempos de espera en los mostradores de facturación habilitando mostradores especiales para facturar únicamente el equipaje.

La facturación suele cerrarse unos 40 minutos antes de la salida de la aeronave. Por ello, la asignación de los mostradores es importante para evitar que pasajeros que lleguen justos de tiempo pierdan el vuelo. Dicha asignación se puede realizar asignando a cada mostrador un vuelo concreto, o por el contrario, tener una serie de mostradores en los que se pueda facturar cualquier vuelo de la compañía. Este último modelo de asignación de mostradores suele tener la siguiente configuración:

- ❖ **Business**: Se factura únicamente a los pasajeros de clase Business o aquellos que dispongan de una tarjeta de pasajero frecuente de la compañía aérea.
 - ❖ **Turista**: Componen la mayoría de los mostradores y están destinados a facturar al resto de pasajeros a cualquier vuelo del día.
 - ❖ **“Drop-off” o “Bag drop”**: Son para aquellos pasajeros que ya dispongan de la tarjeta de embarque y se utilizan únicamente para facturar el equipaje.
 - ❖ **“Last minute”**: Se utilizan expresamente para realizar la facturación de aquellos vuelos cuya facturación esté a punto de cerrarse.
- ***Filtros de seguridad***: Los filtros de seguridad separan la denominada zona tierra del aeropuerto (mostradores de facturación, oficinas de ventas de billetes, llegadas de pasajeros, etc) de la zona aire (zona de embarque, oficinas de tránsito, recogida de equipaje, etc).

Éste es un proceso de vital importancia para asegurar la seguridad aérea a nivel de pasajeros. Su función consiste en verificar el equipaje de mano de los viajeros para

comprobar que no se transporte ningún objeto que pueda atentar contra la seguridad de los demás pasajeros ni de ningún material, que debido a sus características pueda afectar a la seguridad de la operativa. Por otro lado, solo se les permite el acceso a las personas que dispongan de una tarjeta de embarque o a los empleados que tengan su debida acreditación.

- **Asistencia PRM:** Es el servicio encargado de la asistencia de personas con movilidad reducida en los aeropuertos. El servicio consiste básicamente en el transporte y acompañamiento de dichas personas, desde los mostradores de facturación hasta el propio avión.
- **Desembarque/Embarque:** Primero que nada, el desembarque de una aeronave se realiza inmediatamente después de ponerle los calzos a las ruedas y posicionar correctamente el denominado “finger”, o en caso de encontrarse el avión en remoto, las escaleras correspondiente para efectuar la salida de los pasajeros.

Por un lado, se desembarca el pasaje, y de manera separada se lleva a cabo la descarga del equipaje en bodega. Por lo que los pasajeros se deben dirigir en primer lugar a la zona de recogida de equipajes del aeropuerto.

Por otro lado, el embarque no comienza hasta que no se haya realizado toda una serie de servicios como mantenimiento, catering, abastecimiento de combustible, entre otros. Por lo tanto, una vez la aeronave está lista para dar comienzo al embarque, el personal de la puerta debe abrir el sistema informático y realizar las llamadas de embarque necesarias por megafonía, tanto la local como la general del aeropuerto, antes de proceder a embarcar.

El tiempo de dicho embarque puede variar dependiendo de las políticas de embarque de la propia aerolínea, del número de pasajeros a embarcar y de posibles contratiempos que puedan surgir durante el embarque, como puede ser la tardanza de algún pasajero con maleta facturada, ya que entonces la compañía o el agente de handling debe localizar el equipaje de dicho pasajero y extraerlo de la bodega.

Para finalizar el proceso de embarque, una vez están todos los pasajeros a bordo de la aeronave, el personal de la puerta imprime las listas de pasajeros y se las entrega al personal de a bordo.

- **Otras asistencias:** Otras asistencias que están directamente relacionadas con los pasajeros son aquellas que se ofrecen a los pasajeros que se encuentran de tránsito

en un determinado aeropuerto. Entre estos servicios destacan la impresión de nuevas tarjetas de embarque en la zona aire e información referente al estado de los vuelos y localización de puertas de embarque.

Finalmente, en la zona de recogida de equipaje, se encuentran las famosas oficinas de “*lost and found*”, donde se hacen las reclamaciones en caso de pérdida de equipaje.

En lo que se refiere a los recursos necesarios para proporcionar estos servicios, en el ámbito de personal, se requiere de personas con un alto nivel de inglés y del idioma del país. Como mínimo debe haber una persona por mostrador de facturación y dos personas por puerta de embarque, además de disponer de personal en los mostradores de tránsito, en las oficinas de “*lost and found*”, en los filtros de seguridad y para asistencias PRM.

Por otro lado, en lo referente a recursos materiales, es imprescindible el uso de escáneres y de arcos de detección de metales, además de un sistema de información y de megafonía, y disponer de material de asistencia PRM, de etiquetado de maletas, tarjetas de embarque y demás documentación, como hojas de reclamación, entre otros. Finalmente, en el caso que la aeronave se encuentre en remoto, es decir, que se encuentra estacionada lejos de la terminal de pasajero, el encargado del handling debe disponer del autobús para efectuar el transporte de los pasajeros hasta la aeronave y de la escalera para poder acceder a ella.

2.1.2 Servicios a la aeronave

Los servicios a la aeronave son todos aquellos cuya realización no percibe directamente el pasajero, pero que sin embargo, son fundamentales para mantener a la aeronave en condiciones óptimas para llevar a cabo el transporte aéreo de manera segura y eficiente.

- **Carga y descarga del equipaje y demás mercancía:** La manera de cargar el equipaje puede verse condicionada según el tipo de aeronave, ya que si se trata de una aeronave de fuselaje ancho o “*wide-body*”, lo normal es que la bodega de carga esté acondicionada para transportar el equipaje en “palets” o ULD’s, que son contenedores especializados para almacenar y proteger el equipaje durante su transporte de la terminal al avión y durante su estancia en la bodega. No obstante, en caso de tratarse de un avión de tipo fuselaje estrecho o “*narrow-body*”, lo común es que se tenga que cargar el equipaje a granel.

En el caso de cargar una bodega con ULD’s es imprescindible disponer de un vehículo que transporte los ULD’s, de un transferidor y una plataforma elevadora. Así, mediante el transferidor, se traslada los ULD’s de uno en uno a la plataforma elevadora y de ésta

a la bodega del avión, donde a través de un sistema de rodillos, se posicionan en su lugar correspondiente.



Figura 2.1: Carga de ULD's [27]

Por el contrario, si se trata de un avión no acondicionado, los procesos de carga se pueden llevar a cabo de dos maneras. La primera es mediante cintas transportadoras que hacen llegar el equipaje del vehículo a la bodega, y la segunda, siempre y cuando la altura de la bodega lo permita, es hacerlo manualmente. En ambos casos, es necesario el uso de redes para facilitar la sujeción de la carga en la bodega.

- **Servicio de limpieza y mantenimiento:** Este tipo de asistencia puede abarcar todos los servicios de limpieza, tanto del interior como del exterior de la aeronave.

Entre las actividades de limpieza más frecuentes, se destacan:

- ✓ Limpieza general del interior: Esta actividad se realiza durante el tiempo que transcurre desde el fin del desembarque hasta el inicio del embarque, y conlleva, la limpieza de la cabina de pasajeros, la retirada de la basura, etc.
- ✓ Cambio de agua potable: Supone el llenado, mediante una cisterna y una bomba, del depósito de agua potable del avión. Dicha agua es la que se utiliza durante el vuelo en los aseos y como agua potable.
- ✓ Recogida de aguas residuales: Esta actividad es imprescindible ya que durante el vuelo, mayoritariamente procedente del agua de los aseos, se ha ido almacenando en un depósito especial del avión aguas residuales. Así pues, una vez se encuentra la aeronave estacionada, se procede a extraer el agua a través de otro depósito y de una manguera conectada a la parte inferior del fuselaje.

- ✓ Mantenimiento 360º: Consiste en la comprobación del estado de la aeronave a 360 grados, es decir, se comprueba el estado de los neumáticos, de las alas, del fuselaje, entre otros, con el fin de hallar cualquier imperfección que pueda poner en riesgo la seguridad de la operativa y repararla.
- ✓ Proceso de deshielo: Es un proceso que suele ser de gran importancia en determinadas épocas del año y en determinados aeropuertos, donde es frecuente que en las alas de los aviones se concentre nieve que impida a la aeronave volar. Por ello, según qué condiciones, es fundamental tener en los aeropuertos equipos que puedan hacer frente a las posibles congelaciones, mediante el suministro de aire comprimido a altas temperaturas u otros fluidos especiales como líquido anti-hielo.



Figura 2.2: Proceso de deshielo [23]

- **Catering**: El servicio de catering suele llevarlo una empresa distinta del resto del handling, y aparte de encargarse del transporte, carga y descarga de alimentos y bebidas, también se encarga de proveer de prensa, auriculares, material desechable (platos y vasos) e incluso, del material que la compañía comercializa a bordo.

Para llevar a cabo la carga y descarga de la aeronave, el handling de catering requiere de un camión elevador, que consiste en un furgón que se eleva gracias a un sistema hidráulico y cuyo interior está refrigerado para conservar los productos. Normalmente, tales operaciones se realizan en la parte posterior de la aeronave.



Figura 2.3: Gategourmet, empresa de catering [24]

- **Suministro de combustible:** Este proceso de handling es uno de los más críticos y peligrosos, por lo que se extreman las precauciones con el fin de evitar incendios. El agente de handling encargado de suministrar el combustible, es un agente que se dedica exclusivamente a ello, y por tanto, sus controles de calidad y seguridad son extremos.

Es frecuente, no obstante, que determinadas aerolíneas, debido a sus cortos tiempos de escala, decidan realizar los procesos de suministro de combustible y de embarque de pasajeros a la vez. Sin embargo, para ello, previamente, los bomberos del aeropuerto deben estar informados a este respecto, para que puedan actuar de manera rápida si fuese preciso.

Existen dos maneras de suministrar el combustible en los aeropuertos. Una es a través de camiones cisternas que llevan a cabo el proceso mediante mangueras de suministro conectadas al ala del avión, y la segunda es a través de una red de suministro, compuesta por una serie de tuberías y válvulas, ubicadas debajo de la plataforma de estacionamiento. Para la segunda, es necesario disponer de un vehículo especial, denominado dispensador, que es el encargado de conectar la red de suministro con el ala del avión mediante una manguera, y pasando el combustible por una serie de controles y filtros.



Figura 2.4: Dispensador de CHL [22]

- **Suministro de energía:** Una vez la aeronave ha permanecido con los equipos apagados durante el tiempo de escala, es necesario suministrarle potencia eléctrica para que pueda arrancar y ponerse en movimiento una vez más. Para ello, existe tres maneras de suministrar la energía: mediante una unidad auxiliar de potencia del propio avión, conocida como APU (*Auxiliary Power Unit*), mediante un equipo móvil que lo provee el agente de handling y que se conoce como GPU (*Ground Power Unit*), y cuya conexión se realiza a través de un cable que se conecta a la parte delantera de la aeronave. Y finalmente, mediante un equipo fijo del aeropuerto, que se encuentra, normalmente, adjunto a las pasarelas.
- **Desplazamiento de la aeronave:** Una vez la aeronave está lista para salir de la zona de estacionamiento y la pasarela o escalera haya sido retirada, se da lugar el proceso conocido como *push-back*, que consiste en empujar el avión hacia atrás.

Dicho empuje lo hace un tractor de gran potencia que se conecta a las ruedas delanteras de la aeronave y comienza a empujar hacia atrás, mediante barras de remolque o levantando las ruedas del tren delantero.



Figura 2.5: Ground Power Unit y tractor de remolque [26]

2.2 Características del handling en aeropuertos congestionados

En los aeropuertos tiene lugar diversas actividades con una alta competitividad. En el caso de los aeropuertos que se encuentran congestionados, es normal que esta competitividad se incremente, ya que confluyen diversas empresas realizando actividades similares y utilizando instalaciones saturadas ofrecidas por el aeropuerto.

Así pues, tratándose de la asistencia en tierra, es posible estar ante compañías aéreas, empresas de handling en general, empresas de handling específicas y demás empresas de asistencias, cuyas actividades están directamente relacionadas las unas con las otras, por lo que un simple retraso en una de ellas, se puede propagar al resto de actividades, afectando a la calidad del servicio y a la competitividad y eficiencia de las operaciones.

Por ello, se podría considerar que el handling ocupa un papel importante y estratégico, en lo referente a la operativa del transporte aéreo. De ahí, que muchas aerolíneas, al verse incapacitadas para hacer frente al coste que supondría realizar su propio handling, decidan externalizar estos servicios a aquellas empresas que les ofrezcan la calidad de servicio exigido y cuyo precio pueda ser asumido. Como consecuencia, una misma aeronave puede llegar a ser atendida por varias empresas, las cuales deben desempeñar sus tareas conjuntamente.

En resumen, las características más destacables de la asistencia en tierra en aeropuertos congestionados son:

1. Una alta competitividad entre las empresas que desempeñan asistencias similares.
2. Al ser un aeropuerto congestionado, la disponibilidad de determinados recursos, como puertas de embarque, mostradores de facturación, entre otros, es bastante limitada.
3. Con el fin de obtener ventaja competitiva, los tiempos para la realización de las tareas es limitado, y siempre se debe mantener el nivel de exigencia.
4. Existe una fuerte interdependencia entre todas las empresas que realizan algún servicio para una aerolínea, ya que la propagación del error las afecta a todas.
5. El handling en aeropuertos saturados, es un factor crítico para la operativa del tráfico aéreo, y supone un alto porcentaje de los costes de las compañías aéreas.

2.3 Importancia de la programación de la asistencia en tierra

Hoy en día es más que sabido, que uno de los objetivos primordiales de las compañías aéreas es conseguir maximizar el uso de sus aeronaves, o lo que es lo mismo, reducir al máximo los tiempos de escala.

Ello se debe, a que en un mercado tan competitivo como el sector del transporte aéreo, una aeronave en tierra no genera beneficio alguno, más bien todo lo contrario, supone unos costes elevados para la aerolínea. Así pues, lograr que se cumplan los tiempos de escala que la compañía tiene previsto, es responsabilidad, en gran medida, de aquellas empresas encargadas de la asistencia en tierra. De ahí, que la programación que tengan estas empresas para realizar los servicios de handling, sea tan importante y afecte directamente, no solo al cliente sino también al resto de empresas implicadas en el handling.

Sin embargo, se debe tener en consideración toda una serie de factores que pueden ocasionar perturbaciones en la operativa de los aeropuertos congestionados, como son:

- La saturación de los recursos ofrecidos por el aeropuerto en cuestión, facilita la propagación de los retrasos, ya que se altera la programación inicial, y aquellos recursos que una operación tenía asignados pueden no estar disponibles en el momento oportuno para llevarla a cabo.
- Los niveles de exigencia de las compañías afectan a la manera de realizar las operaciones, por lo que según qué circunstancias, pueden ser causantes de posibles retrasos.
- El desempeño con el que otras empresas del entorno realizan sus funciones, pues en aeropuertos congestionados existe una estrecha relación entre ellas y la programación de las demás puede verse alterada.
- Imprevistos del entorno ajenos a las empresas, como son las situaciones climatológicas, huelgas, etc.

Todas estas alteraciones de la programación de la asistencia en tierra tienen diversas consecuencias según los diferentes implicados.

Por un lado, para las compañías aéreas supone un aumento de los costes operativos, además de pérdida de ventaja competitiva, que en definitiva, actualmente es lo que toda empresa intenta evitar, más aun en mercados cuyos costes operativos son elevados y existe una alta competencia.

Por otro lado, en lo que se refiere a los agente de handling, podría significar la pérdida de un cliente y sanciones económicas. Y en el caso de los aeropuertos, implicaría un deterioro importante de la imagen, con lo que muchos pasajeros se podrían plantear otros medios de transporte.

A continuación se presenta un ejemplo de la programación del handling. Dicho ejemplo es típico en compañías *low cost*, cuyos trayectos son de medio y corto alcance, por lo que los tiempos de transporte son cortos, y asimismo, los tiempos de escala.

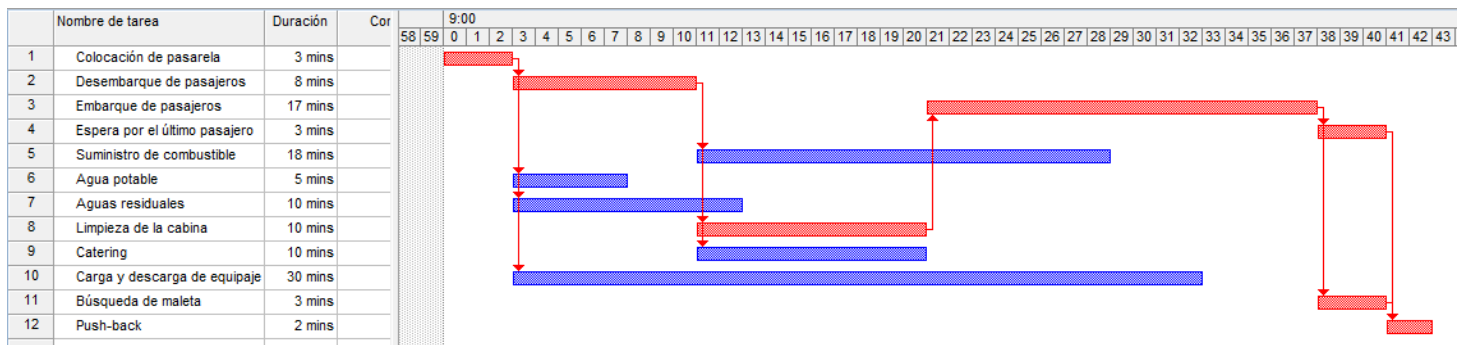


Figura 2.6: Diagrama de Gantt de una escala

En este caso, la duración de la escala es de 40 minutos aproximadamente. Para lograr estos tiempos, es imprescindible, una vez colocada la pasarela, la realización de varias actividades a la vez, como es el caso de los servicios de agua potable, de aguas residuales y la descarga y carga del equipaje y demás mercancías.

En lo referente al suministro del combustible, se realiza una vez hayan desembarcado los pasajeros, al igual que los servicios de limpieza y de catering, que en este caso concreto se llevan a cabo de manera simultánea.

Por otro lado, se observa que la mayoría de las actividades en este tipo de escalas, son tareas críticas, es decir, son tareas que no se pueden retrasar porque sino retrasarían el tiempo global de la escala, con todo y que ya se tiene en consideración un tiempo reservado a la espera de un pasajero rezagado y de la búsqueda de su maleta en bodega. Aun así, los agentes de handling deben velar por el cumplimiento de estos tiempos, y para ello, deben implementar toda una serie de controles en tiempo real.

Actualmente, los agentes de handling, a través del sistema de información, saben en todo momento cuan avanzado está el embarque de una aeronave, cuántas maletas hay en bodega, cuántos pasajeros faltan por embarcar, etc. Además, existe un departamento de operaciones que se encarga de analizar toda esta información e ir informando al personal de la empresa, y

en especial a los coordinadores o despachadores de vuelo, para que pueda haber una buena coordinación entre todas las tareas implicadas y se puedan alcanzar los tiempos objetivos, respetando los niveles de servicio exigidos por los clientes.

Un par de ejemplos de acuerdos de niveles de servicio son:

- En caso de tratarse de una aeronave con una capacidad de asientos entre los 100 y los 165, el tiempo de entrega del último equipaje, si se trata de equipaje sin “paletizar” o suelto, no debe ser superior a 30 minutos desde la llegada de la aeronave, o si se trata de equipaje “paletizado” o cargado en ULD’s, el tiempo debe ser de 25 minutos.
- En caso de tratarse de una aeronave de entre 165 y 260 asientos de capacidad, los tiempos de entrega exigidos serán de 40 minutos para el equipaje suelto y 35 minutos para el equipaje cargado en contenedores ULD’s.
- Los tiempos de facturación no deben ser superiores a 3 minutos por pasajero.
- Los tiempos de escala en vuelos de corto y medio alcance no debe superar los 40 minutos, y en los vuelos de largo recorrido la hora y media.

Toda esta serie de acuerdos de niveles de servicio dependerán, en gran medida, de los clientes, siempre y cuando, no entren en contradicción con los estándares exigidos por IATA o por los organismos que regulen el transporte aéreo en los diferentes países.

El no cumplimiento de estos niveles de servicio puede acarrear para el agente de handling penalizaciones económicas según el contrato que lo vincule con la aerolínea.

2.4 Conclusiones

Finalmente, queda evidenciada la complejidad de la asistencia en tierra en los aeropuertos, y más aun si son aeropuertos congestionados, pues son un conjunto de actividades y servicios, realizados por diversas empresas, que están fuertemente interrelacionados entre ellos, por lo que una actividad desarrollada de manera errónea puede desencadenar una propagación de errores y de retrasos al resto de actividades. Todo ello, no tan solo supone pérdidas económicas para todas las empresas implicadas, sino también pérdida de eficiencia y de ventaja competitiva, lo cual es fundamental en mercados altamente competitivos, como lo es en este caso, el sector aéreo.

Bajo esta premisa, y sobre todo en aeropuertos congestionados, cuyos recursos están saturados y limitados, es de vital importancia para los agentes de handling, disponer de

buenos mecanismos y sistemas para elaborar la programación de la asistencia en tierra en estos aeropuertos, cuya finalidad sería la de proporcionar a la empresa una mayor eficiencia y competitividad.

CAPÍTULO 3

Análisis de métodos y software existentes de programación de la asistencia en tierra

Con la finalidad de obtener un mayor conocimiento sobre mecanismos de programación de la asistencia en tierra, se presenta a continuación una clasificación y un análisis de una serie de métodos y software ya existente, que pueden ser de gran ayuda para la programación y planificación de los recursos de handling en aeropuertos congestionados:

3.1 Análisis de métodos

3.1.1 Especificación de la clasificación de parámetros

Lista de parámetros	Tipos
1. Medidas de rendimiento	1.1 Minimizar la variación del uso de los recursos en el tiempo
	1.2 Minimizar el coste total de utilización de recursos
	1.3 Minimizar costes de retraso
	1.4 Minimizar costes de precocidad (earliness)
	1.5 Minimizar costes de "rescheduling"
	1.6 Minimizar el impacto negativo de perturbaciones
	1.7 Maximizar el uso de los recursos
	1.8 Maximizar el número de tareas asignadas
2. Incertidumbre	2.1 Tiempo de llegada de la aeronave
	2.2 Funcionamiento de las máquinas
	2.3 Llegadas de pasajeros
	2.4 Eficiencia de recursos
	2.5 Condiciones medioambiental
	2.6 Saturación de recursos
	2.7 Asignación de tareas

3. Recursos	3.1 Disponibilidad en tiempo
	3.2 Disponibilidad de otros recursos para su uso
4. Calidad	4.1 Efectividad del uso de recursos
	4.2 Efectividad del uso del tiempo
5. Restricciones	5.1 De precedencia
	5.2 Temporales
	5.3 De recursos

Tabla 3.1: Parámetros

3.1.2 Análisis de métodos sujeto a la clasificación de parámetros

Parámetros Métodos	1	2	3	4	5
3.2.1 MAS	1.1 / 1.2 / 1.3	2.1	3.1 / 3.2	4.1 / 4.2	5.1
3.2.2 Co-evolutionary learning approach	1.3 / 1.5	2.2 / 2.3 / 2.4 / 2.5 / 2.6	3.1	4.2	5.2
3.2.3 Alternative Activities	1.3 / 1.4 / 1.6	2.1 / 2.2 / 2.3 / 2.4 / 2.5 / 2.6	3.1 / 3.2	4.2	5.1 / 5.3
3.2.4 Neuro-Evolution	1.7 / 1.3	2.5 / 2.6	3.1	4.1	5.3
3.2.5 Column Generation	1.8	2.7	3.1 / 3.2	4.1 / 4.2	5.2
3.2.6 Stochastic approximation	1.3 / 1.5	2.2 / 2.3 / 2.4 / 2.5 / 2.6	3.1	4.2	5.2
3.2.7 Single-Project approach	1.3 / 1.4 / 1.6	2.1 / 2.2 / 2.3 / 2.4 / 2.5 / 2.6	3.1 / 3.2	4.2	5.1 / 5.3

Tabla 3.2: Taxonomía

3.1.2.1 “Multiagent scheduling” [16]

Notación:

S : Programación S ;

PA_i : *Project agent* responsable de un proyecto i ;

RA_k : *Resource agent* responsable de un recurso de tipo k ;

c_k^u : Coste de utilización de un recurso de tipo k ;

$u_{t,k}$: Utilización del recurso k durante el intervalo t ;

c_i^d : Coste de retraso en un intervalo de tiempo discreto;

dl : Retraso del proyecto comparado con una programación sin restricciones de recursos;

$rc(a_{i,j}, S)$: Coste de utilización de un recurso de la actividad $a_{i,j}$ dada la programación S ;

MC_{RA_k} : Coste marginal de utilización de un recurso;

$dl^m(a_{i,j}, S)$: Retraso marginal causado por la programación a la actividad $a_{i,j}$;

$est(a_{i,Ni+1}, S^{i,j})$: Es el tiempo de comienzo más precoz posible de la actividad ficticia $a_{i,Ni+1}$ dada la programación $S^{i,j}$;

MC_{PA_i} : Coste marginal del *project agent*,

El *multiagent scheduling* es un método en el que se ayuda tanto a las aeronaves (“*project agents*”) como a los proveedores de servicios de tierra (“*resource agents*”) a considerar sus propios intereses en la realización de su programación, considerando la incertidumbre 2.1.

Cada *project agent* es responsable de una serie de actividades, aunque en principio, no tiene en consideración las restricciones de precedencia de dichas actividades (5.1). Por ello, los *resource agents*, que son los responsables de los recursos (3.1 y 3.2), son los que negocian con los otros *projects agents* el tiempo de inicio de las actividades, con el fin de lograr 4.1 y 4.2.

Sin embargo, con este método todos intentarían alcanzar sus objetivos. En este caso concreto, el objetivo considerado para los *resource agents* ha sido el 1.1. Para alcanzarlo, se intenta minimizar la siguiente función de coste de utilización, la cual es la que determinará el precio de reserva de un slot de tiempo:

$$fRA_k(S) = c_k^u \cdot \sum_{t=0}^{\infty} u_{t,k}^2(S)$$

Por otro lado, los *project agents* tienen objetivos diferentes a los *resource agents*. En este caso, se considera la función objetivo de los *PA* como la suma de los objetivos 1.3 y 1.2:

$$fPA_i(S) = c_i^d \cdot dl_i + \sum_{j=1}^{Ni} rc(a_{i,j}, S)$$

Con el fin de dividir la función de coste $fRA_k(S)$ en requerimientos de recursos de actividades individuales, se emplea en este método la aproximación “online scheduling”, mediante la cual se ordenan las actividades según el tiempo de ejecución $(t_i^r): i, j \in \{1, \dots, M\}, i < j$ sí $t_i^r < t_j^r$. Así pues, la actividad $a_{i,j}$ solo se podrá programar si previamente se han programado las actividades predecesoras. Es por ello que los *project agents* utilizarán el MC_{RA_k} como coste $rc(a_{i,j}, S)$ para programar $a_{i,j}$ en $S_{i,j}$.

$$MC_{RA_k}(a_{i,j}, S^{\leq i,j}) = c_k^u \sum_{t=S_{i,j}}^{S_{i,j}+p_{i,j}} [u_{t,k}^2(S^{\leq i,j}) - u_{t,k}^2(S^{\leq i,j-1})]$$

Por otro lado, para distribuir el coste de retraso a lo largo de las actividades, se utiliza el retraso marginal, con el que se puede obtener el tiempo de finalización más precoz posible de un proyecto:

$$dl^m(a_{i,j}, S) = est(a_{i, Ni+1}, S^{\leq i,j}) - est(a_{i, Ni+1}, S^{\leq i,j-1})$$

Finalmente obtenemos el coste marginal del *project agent*:

$$MC_{PA_i}(a_{i,j}, S^{\leq i,j}) = MC_{RA_k}(a_{i,j}, S^{\leq i,j}) + dl^m(a_{i,j}, S)$$

No obstante, para que tanto los “*project*” como los “*resource*” lleguen a un acuerdo para alcanzar sus respectivos objetivos, se propone el siguiente mecanismo para programar las actividades:

1. PA_i comienza la programación de la actividad $a_{i,j}$ cuando todas las demás actividades predecesoras hayan sido programadas y le envía los requerimientos a RA_k
2. RA_k elabora una lista de ofertas, utilizando el modelo de la función MC_{RA_k} , comenzando por el tiempo de comienzo más precoz y se los envía a PA_i .
3. PA_i les añade el coste de retraso marginal a estos slots (función MC_{PA_i}) y selecciona la opción más económica para la actividad $a_{i,j}$.

4. RA_k programa dicha actividad en el slot seleccionado y se continúa con la siguiente actividad.

Sin embargo, como se puede observar, los *project agents* únicamente comparten la información necesaria, con lo que se pueden perder soluciones más óptimas. Por ello, aparece el concepto de “*cooperative scheduling*”, donde ambos agentes comparten más información y se introduce el término de “ventanas de tiempo de seguridad”, con la finalidad de que un cambio en un slot no cause ningún retraso en el proyecto.

3.1.2.2 “Co-evolutionary learning approach” [16]

Notación:

I_i : Individuo del *project agent* i ;

$t_{i,j}^{slk}$: *Slack time* insertado a la actividad $a_{i,j}$;

$\alpha_{i,j}$: Factor de escala que determina el tiempo muerto que se debe insertar a una actividad;

$p_{i,j}$: Tiempo de proceso de una actividad;

$t_{i,j}^{ext}$: Extensión de la duración;

$c_i^d \cdot dl_i^{IC}$: Coste de retraso actual del proyecto;

$\sum_{j=1}^{Ni} rc^{IC}(a_{i,j}, S)$: Coste de utilización de recurso actual de todas las actividades;

Debido a los incidentes que se pueden dar lugar en las operaciones de handling (2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6) y que afectan a las demás actividades, incrementando sus tiempos, y en consecuencia, el tiempo total del proyecto, se plantea añadir unos “tiempos muertos” (*slack time*) para garantizar el tiempo de inicio de las otras actividades según lo planeado (5.2, 3.1 y 4.2).

No obstante, añadir un tiempo excesivamente largo o excesivamente corto, puede acarrear altos costes de retraso o de “*rescheduling*”. Por ello, mediante este método, se intenta conseguir un tiempo muerto óptimo, es decir, el *project agent* busca minimizar ambos costes (1.3 y 1.5).

Para conseguirlo, se emplea un “*Genetic Algorithms*” (en adelante *GA*) dentro de cada *project agents*, por lo que sus estrategias individuales co-evolucionan en un entorno de planificación multi-proyecto.

Un individuo I_i de un *project agent* i viene determinado por un vector de N_i valores reales: $I_i = (\alpha_{i,1}, \dots, \alpha_{i,N_i})$, donde el factor de escala $\alpha_{i,j} \in [0,1]$ determina el tiempo muerto que se debe insertar. Dicho tiempo viene dado por la siguiente función:

$$t_{i,j}^{slk} = \alpha_{i,j} \cdot p_{i,j}$$

Como se puede observar, en este caso se ha restringido que el *slack time* no sea superior al tiempo de proceso de la actividad. En caso de que se quiera modificar esta restricción, bastaría con modificar el límite superior del factor α .

Ahora bien, para seleccionar el valor más apropiado de cada individuo $f(I_i)$, se lleva a cabo una simulación con una serie de imprevistos. Cada vez que ocurre uno de estos imprevistos, causa una extensión de la duración, lo que lleva a tres situaciones diferentes:

1. $t_{i,j}^{ext} \leq t_{i,j}^{slk}$
2. $t_{i,j}^{ext} > t_{i,j}^{slk}$ (sin invalidar la planificación de las actividades posteriores)
3. $t_{i,j}^{ext} > t_{i,j}^{slk}$ (invalidando algunas de las planificaciones de actividades posteriores)

El valor óptimo de un individuo se determina por la suma del coste de retraso actual del proyecto y el coste de utilización de recurso actual de todas las actividades cuando el proyecto es completado:

$$f(I_i) = c_i^d \cdot dl_i^{IC} + \sum_{j=1}^{N_i} rc^{IC}(a_{i,j}, S)$$

Así pues, *GA* comienza computarizando una primera generación con valores aleatorios de α . Posteriormente, calcula los valores óptimos de los individuos, y mediante la simulación, se pueden aplicar toda una serie de operadores genéticos, como cruce y mutación, generando nuevas soluciones. Finalmente, programando los servicios de tierra de manera repetitiva, *GA* consigue crear una mejor configuración de tiempos muertos.

3.1.2.3 "Alternative Activities in Resource-Constrained Project Scheduling Problem" [11, 12]

Notación:

R : Recursos;

A^+ : Actividades potenciales;

P^+ : Contiene todas las restricciones potenciales de precedencia;

Q^+ : Contiene todas las dependencias potenciales;

X^+ : Contiene todas las actividades de sustitución potenciales;

M^+ : Contiene todas las dependencias entre los elementos de A^+ ;

En este método se pretende extender el concepto de "Resource-Constrained Project Scheduling Problem" (RCPSP) a actividades alternativas, y de esta manera, hacer frente a las perturbaciones (2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6) velando por lograr los objetivos 1.3, 1.4 y 1.6.

El concepto de actividades alternativas se distingue entre actividades activas e inactivas, con lo que activando y desactivando actividades es posible cambiar el estado de activación del modelo.

Formalmente, x -RCPSP se puede describir de la siguiente manera:

Es un proceso compuesto por una serie de actividades potenciales $A^+ = \{0, 1, \dots, N, N+1\}$, donde el primer y último elemento indican de forma abstracta el inicio y el final de las actividades, por lo que tienen una duración 0 y no requieren de ningún recurso. Las demás tareas tienen asignada una duración $d_i > 0$ y para su ejecución, es necesario disponer de una serie de recursos de tipo $R = \{1, \dots, r\}$, que 3.1 y 3.2, con una cantidad constante de c_k .

Por otro lado, pueden haber varias formas de dependencia de actividades según las restricciones de precedencia P^+ (5.1: actividad $i \in A^+$ debe estar finalizada antes o después del inicio de la actividad $j \in A^+$) o los requerimientos de recursos Q^+ (5.3: actividad $i \in A^+$ requiere de una cantidad constante de $q_{i,k}$ unidades del recurso tipo $k \in R$).

Además, si $x_{i,j}$ está contenida en el grupo de actividades de sustitución potenciales X^+ , es decir, que la actividad j puede sustituir la actividad i , se debe velar por las posibles restricciones que pueda haber al respecto M^+ , como que i deba estar activada para activar j o que i deba desactivarse para activar j y viceversa.

Finalmente, la solución de $x-RCPSP$ es una combinación del modelo de estado de activación y la secuencia de todas las actividades activas. Por lo que una programación S , representada por un vector de tiempos de inicio de las actividades activas, será válida si satisface las restricciones definidas en M^+ y los tiempos de inicio $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ en el instante t son:

- $0 \leq \beta_i$ para todo $i \in A$
- $\beta_i + d_i \leq \beta_j$ según P^+
- $\sum_{i \in A(t)} q_{i,k} \leq c_k$ para todo $k \in R$ en el instante t

Para llegar a dicha solución se utiliza el “*Evolutionary Algorithm*”, donde la programación original se convierte en una lista de actividades λ_0 , obtenida simplemente seleccionando todas las actividades activas por sus tiempos de inicio programados, con lo que se considera la primera generación. Las demás generaciones se obtienen aplicando una serie de operadores (cruce y mutación), de tal manera que en cada paso de evolución, se combinan los mejores individuos con nuevos, generados a través de los anteriores operadores y de forma aleatoria para evitar óptimos locales, y en consecuencia, es posible identificar una configuración óptima mediante *GA* (4.2).

3.1.2.4 “*Neuro-Evolution Scheduling*” [17]

Para ponerse en antecedentes, es un método de restricciones de tipo 5.3 en el que dados unos slots o ventanas de tiempo para el uso de determinados recursos 3.1 que pueden verse congestionados según qué condiciones (2.5), como puede ser el caso de las estaciones de deshielo o *deicing*, los agentes se ven incentivados a reservar los slots lo antes posible. No obstante, ello puede conducir a programaciones sub-óptimas, en vez de conseguir 4.1.

Para ello, se introduce el uso de sanciones de liberación, con lo que se fuerza a los agentes a considerar posibles incertidumbres y reservar los slots más tarde, cuando tengan total confianza de que puedan cumplir con su slot y así alcanzar el objetivo 1.7.

Por otro lado, se considera que el tiempo que transcurre, desde que la aeronave puede utilizar el recurso hasta que finalmente empieza su slot, es tiempo de retraso. Por lo que la pregunta clave a la que debe hacer frente todo agente, es cuándo reservar el slot: ¿Reservar el primer slot disponible o uno más tarde? Velando por el objetivo 1.3 y teniendo en consideración la incertidumbre 2.6.

Por lo tanto, con la finalidad de tomar una buena decisión al respecto, es imprescindible hacer una buena estimación de los incidentes. A tal fin, se le asocia a cada aeronave una “red neuronal” representada por tres nodos input y un nodo sesgo, por una capa oculta con otros tres nodos, y finalmente, un nodo output, haciendo un total de quince conexiones, cada una con su propio factor de peso:

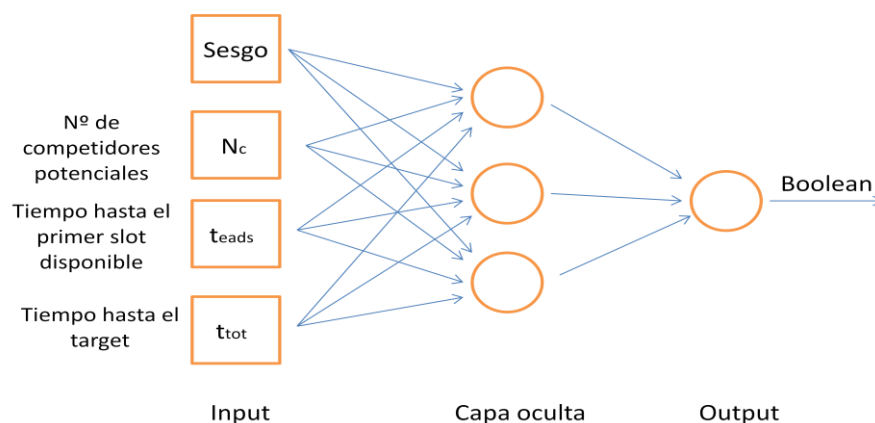


Figura 3.1: Representación de una red neuronal

El output de dicha red debe dar respuesta a la pregunta anteriormente planteada.

3.1.2.5 “Manpower Allocation using Column Generation” [4, 8]

Notación:

C : Conjunto de tareas;

V : Conjunto de equipos no homogéneos;

a_i : Tiempo más precoz de comienzo de una tarea i ;

b_i : Tiempo de retraso máximo para el comienzo de una tarea i ;

r_i : Número de equipos necesarios para completar la tarea i ;

$t_{i,j}$: Tiempo de transporte entre la tarea i a la j , incluyendo el tiempo de servicio de la tarea i ;

g_{ik} : Parámetro binario que define si el equipo k cumple con los requerimientos de la tarea i ;

e_k : Tiempo de inicio del equipo k desde el “*service center*”;

f_k : Tiempo de regreso del equipo k al “*service center*”;

t_{0i} : Tiempo de transporte desde el “*service center*” (0) hasta la tarea i ;

P_k : Conjunto de caminos factibles para el equipo $k \in V$;

a_{ik}^p : Define si la tarea i está en el camino p para el equipo k ;

δ_i : Número de sub-tareas sin asignar de la tarea i ;

P'_k : Conjunto de caminos prometedores;

λ_k^p : Variable de decisión binaria con la que se selecciona un camino p para cada equipo k ;

s_i^p : Punto en el tiempo donde la ejecución de la tarea i puede comenzar en el camino p ;

“*Manpower Allocation Problem with Time Windows and Job-Teaming Constraints*” es el problema de asignar m equipos a un número de tareas (m – *MAPTWTC*), teniendo en cuenta las restricciones de tipo 5.2. Este método, además, intenta dar solución al impacto negativo que pueda causar la incertidumbre 2.7, por lo que se plantea como objetivo el 1.8, teniendo en consideración 3.1 y 3.2, de tal manera que se consiga 4.1 y 4.2.

Para ello, el estudio se enfoca en la programación de las tareas de asistencia en tierra, donde se debe tener en consideración las ventanas de tiempo y las habilidades requeridas por cada tarea, el tiempo de transporte entre las diferentes localizaciones, las horas de trabajo del personal y los requerimientos de sincronización entre los diferentes equipos que interactúan en cada tarea realizando sub-tareas, entendiéndose como equipo, un grupo fijo de trabajadores.

Definición de m -MAPTWTC :

Para cada tarea de $C = \{1, \dots, n\}$, se le atribuye una duración, una ventana de tiempo, una serie de habilidades requeridas y una localización. Así pues, para cada $i \in C$ se define una ventana de tiempo como $[a_i, b_i]$, en el que $a_i > 0$ es el tiempo más precoz y $b_i > 0$ el tiempo más tarde de comienzo de la actividad i . Además, para cada pareja de tareas (i, j) se les asigna un tiempo $t_{i,j} > 0$, el cual contiene el tiempo de transporte de la actividad i a la j , así como el tiempo de servicio de la tarea i . El valor de g_{ik} es un parámetro binario en el que se define si el equipo k cumple con los requerimiento de la tarea i ($g_{ik} = 1$ o $g_{ik} = 0$).

Por otro lado, para cada $k \in V$ también se define una ventana de tiempo $[e_k, f_k]$, en la que el equipo empieza en el "service center" en el instante $e_k > 0$ y debe regresar no más tarde de $f_k > 0$. La localización de dicho "service center" es 0 y el tiempo de transporte a cada tarea i es t_{0i} .

Cada camino es definido por las tareas por las que pasa, de tal manera que $a_{ik}^p = 1$ si la tarea i está en el camino p para el equipo k . De cualquier otra manera, $a_{ik}^p = 0$.

Con el "Integer Master Problem" se selecciona el camino factible para cada equipo, de manera que se maximicen las tareas asignadas. No obstante, se considera el problema como una minimización de las sub-tareas sin asignación de la tarea i (δ_i) y se utilizan, únicamente, un conjunto de caminos prometedores P'_k , en vez de P_k . Así pues, en el contexto de "column generation", P'_k contiene todos los caminos generados para el equipo k , y se introduce una variable de decisión binaria (λ_k^p) con la que se selecciona un camino p de P'_k para cada equipo k .

De esta manera, se llega al "Restricted Master Problem":

$$\min \sum_{i \in C} \delta_i$$

Sancionando asignaciones inadecuadas a una tarea, incrementando δ_i :

$$\delta_i + \sum_{k \in V} \sum_{p \in P'_k} a_{ik}^p \lambda_k^p \geq r_i$$

Y asegurándose que únicamente se seleccione un camino para cada equipo:

$$\sum_{p \in P'_k} \lambda_k^p = 1$$

Finalmente, se llega a problemas de sincronización si existen variables positivas de λ_{k1}^{p1} y λ_{k2}^{p2} asociadas a los caminos diferentes p_1 y p_2 , ambos conteniendo la actividad i donde s_i^{p1} es diferente de s_i^{p2} . Para ello, se define $s_i^* = \left\lceil \frac{(s_i^{p1} + s_i^{p2})}{2} \right\rceil$ y se ramifica el problema en dos, definiendo nuevas ventanas de tiempo para la tarea i :

$$[a_i; s_i^* - 1] \text{ y } [s_i^*; b_i]$$

Aquellas columnas que no respetan las nuevas ventanas de tiempo, son reemplazadas por nuevas columnas que sí respeten las ventanas de tiempo modificadas. La idea básicamente, es la de restringir el número de puntos en el tiempo, en el que la ejecución de la tarea i puede comenzar.

3.1.2.6 “Cost optimal robust-schedules using Stochastic approximation” [19]

Notación:

a : Dimensión de la reserva temporal;

s : Estado actual;

$p(x | s)$: Probabilidad de que el servicio requiera x unidades de tiempo adicional dado el estado actual s ;

$dc(s, a)$: Coste de añadir una reserva temporal a , que depende del estado s ;

$rs(s, a, x)$: Coste de “rescheduling” esperado en el estado s dada una reserva temporal a y duración de un incidente de x ;

$etc(s, a)$: Coste total esperado de añadir una reserva temporal de dimensión a después de un servicio en el estado s ;

La asistencia en tierra es bien conocida por las perturbaciones (2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6), que suelen ocurrir durante la ejecución de los servicios necesarios para llevar a cabo las escalas de las aeronaves en los aeropuertos. Debido a dichos incidentes, la duración de las

actividades suele alargarse más de lo planeado, por lo que se debe realizar una re-planificación de los servicios, causando costes adicionales.

Sin embargo, introducir reservas temporales, también alarga el tiempo de las escalas, y en consecuencia, también introduce costes adicionales. El coste derivado de la inserción de dicha reserva temporal, procede de la suma del coste de retraso causado y del coste de “rescheduling” (en caso que la reserva no haya sido suficiente).

De esta manera, cuando se selecciona la dimensión de estas reservas temporales 3.1, se busca conseguir los objetivos 1.3 y 1.5 bajo restricciones 5.2, y como resultado, se intenta obtener 4.2. A tal fin, se tiene un dominio continuo de posibles acciones (dimensiones de las reservas) y continuos estados determinados por las perturbaciones.

Así pues, el coste total esperado viene dado por la siguiente función:

$$etc(s, a) = dc(s, a) + \int_a^{\infty} p(x | s) \cdot rs(s, a, x) dx$$

Y la reserva temporal óptima a dado un estado s es de una dimensión para la que:

$$\frac{\partial}{\partial a} etc(s, a) = 0$$

Por lo tanto, se debe hallar una política óptima $\pi(S)$, en el que $\pi^*(S) = a^*$ y $etc(s, a^*)$ sea mínimo. Para ello, se utiliza una adaptación de la teoría de aproximación estocástica, en la que la función estocástica que describe la variable aleatoria es $Z(a, x) = -(rs(s, a, x) + dc(s, a))$ asumiendo que el estado s es fijo.

Finalmente, el valor esperado de la variable aleatoria es:

$$\mu(a) = Ex(Z(a, x)) = etc(s, a)$$

Y conociendo dicho valor aleatorio, es posible calcular la dimensión de una reserva temporal, de manera que sea lo más óptima posible.

3.1.2.7 “Single-Project approach” [15]

Notación:

\overline{RI} : “Release time” del mega-proyecto;

rl_i : "Release time" de un proyecto concreto;

\overline{DI} : "Deadline" del mega-proyecto;

dl_i : "Deadline" de un proyecto concreto;

En una aproximación "single-project", cada proyecto individual es agregado a un "mega-proyecto", el cual es representado por una red AoN. Esta red AoN combina todas las redes de actividades de los proyectos y les añade dos actividades "dummy", de inicio (0) y de fin ($n + 1$).

El "release time" del mega-proyecto (\overline{RI}) viene definido por el "release time" del proyecto más precoz, así como el "deadline" (\overline{DI}) viene definido por el "deadline" del proyecto más tardío:

$$\overline{RI} = \min(rl_i) \quad \overline{DI} = \max(dl_i)$$

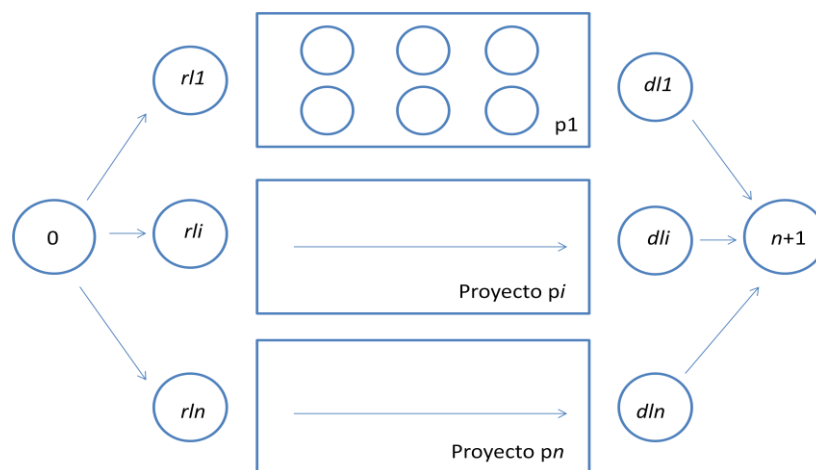


Figura 3.2: Ejemplo de red AoN

Por último, en ir agregando múltiples proyectos en el mega-proyecto, la solución puede obtenerse a través de *RCPSP*, por lo que sería un caso del método 3.3.

No obstante, no siempre sería aplicable dicho método ya que:

1. Agregando múltiples proyectos a un mega-proyecto, se asume sanciones de retraso para todos los proyectos de forma equitativa.
2. Se dificulta el análisis de proyectos independientes.
3. Se incrementa la complejidad de la red.

Por ello, son importantes los métodos, ya explicados con anterioridad, conocidos como “*multi-project approaches*”, en los que se pueden resolver los proyectos de manera independiente.

3.2 Análisis de software para “Ground Handling Scheduling”

El presente apartado tiene como objetivo describir el estado del conocimiento en el campo de la optimización de las operaciones de handling en los aeropuertos, así como, presentar el planificador de recursos de handling que se ha desarrollado en este proyecto.

La mejora en las operaciones handling se centra principalmente en:

1. La asignación de recursos móviles con el fin de minimizar los tiempos de asistencia a las aeronaves y aumentar la eficiencia en la utilización de los recursos, evitando situaciones de cuello de botella.
2. Optimización a nivel operativo en la zona de recogida de equipajes con el fin de evitar bloqueos en cascada de maletas en las cintas de recogida.

Estos problemas de optimización se caracterizan por su alto nivel de complejidad que se deriva directa o indirectamente a través de múltiples factores, tales como programación de vuelos, condiciones meteorológicas, patrones de llegada de pasajeros, tiempos operacionales estocásticos, etc. Soluciones incorrectas pueden causar un aumento en los tiempos de respuesta, lo que puede aumentar significativamente los costes de un operador handling. Por lo tanto, la optimización de las operaciones de handling es un campo actual de investigación que requiere de la aplicación de métodos y herramientas sofisticados de optimización en combinación con la utilización de buenas prácticas operativas. La aplicación práctica de tales métodos y herramientas pueden repercutir en menores costes operativos, en el aumento de los niveles de servicio y en la disminución de la congestión en los aeropuertos, sin costosas inversiones en infraestructuras con el fin de aumentar su capacidad.

El propósito es presentar una lista detallada de herramientas comerciales que se utilizan actualmente (o se pueden utilizar) para la optimización de las operaciones de handling en los aeropuertos europeos y de los EE.UU. Las diferentes herramientas de optimización se describen según la siguiente plantilla.

1. Nombre de la herramienta (las siglas y el significado).
2. Empresa que vende la herramienta y ofrece atención al cliente.
3. Sitio web: Sitio web del producto.
4. Objetivos perseguidos por la herramienta.

5. Descripción de la herramienta como su área de aplicación y las funcionalidades principales.
6. Las fortalezas de la aplicación: Una lista de las ventajas distintivas de la herramienta.
7. Integración de la aplicación a los sistemas aeroportuarios o el cumplimiento de las normas de la industria.
8. Referencias, donde se ha probado la herramienta.

Clasificación de herramientas comerciales de optimización:

3.2.1 *GroundStar RealTime*

Nombre: *GroundStar RealTime*

Empresa: INFORM

Sitio web: <http://www.groundstar.aero>
<http://www.airport-technology.com/contractors/consult/inform/>

Objetivos: Minimizar los tiempos de asistencia de aviones y maximizar la utilización de los recursos móviles e inmóviles.

Descripción: Con el fin de trabajar en tiempo real *GroundStar* aplica algoritmos de optimización para asignar y reasignar los recursos móviles e inmóviles de acuerdo a la programación de vuelos constantemente cambiante. Una adaptación óptima de los recursos y las tareas se realiza teniendo en cuenta las distancias de viaje, las prioridades de asistencia, las capacidades de carga y descarga y otras variables, así como las condiciones técnicas y organizativas.

The GroundStar RealTime se integra con múltiples fuentes de información para asegurar que todos los detalles de la operación estén disponibles. Esta herramienta interactúa con la herramienta *Groundstar GroundFleet* para recibir información en tiempo real y con la asignación de *Groundstar*.

Fortalezas de Estructura modular.

la aplicación:

Integración: Permite la integración con el sistema *GroundStar* para el apoyo inteligente de las operaciones de asistencia en tierra y los procesos aeroportuarios.

Referencias: KLM, Lufthansa, Flughafen Zürich AG, GlobeGround Berlin, etc.
<http://www.groundstar.aero/references.htm>

3.2.2 GHS- REALTIME

- Nombre:** *Ground Handling System (GHS) – REALTIME*
- Empresa:** Topsystem Systemhaus GmbH
- Sito web:** <http://www.topsystem.de/en/aviation/ghs.htm>
- Objetivos:** Minimizar los tiempos de asistencia de aviones y aumentar la eficiencia en la utilización de los recursos móviles e inmóviles.
- Descripción:** El *GHS-REALTIME* se utiliza en tiempo real para la programación y la reprogramación de los recursos móviles e inmóviles bajo las limitaciones operacionales y de acuerdo a la información disponible del vuelo. El sistema es capaz de optimizar la asignación completa de recursos para las operaciones de asistencia en tierra, teniendo en cuenta las distancias de viaje, capacidades de carga y las restricciones locales y de organización, priorizando determinadas tarea y otras variables.
- El módulo *Task-Optimizer* controla la validez de la distribución de tareas y asignación de recursos resultante. También se puede usar este módulo para modificar las asignaciones de recursos (si fuese necesario) y las tareas pueden ser transmitidas al personal de forma automática a través de herramientas de comunicación móvil.
- Fortalezas de la aplicación:** Estructura modular. Basado en una tecnología web que permite a toda la compañía el acceso a la base de datos.
- Integración:** Módulo que permite la integración con el sistema GHS.
- Referencias:** Aeropuerto de Bologna, Düsseldorf Ground Handling, GroundForce Portugal, etc. <http://www.topsystem.de/en/aviation/references.htm>

3.2.3 SMART RMS

- Nombre:** *SMART Airport Resource Management System (SMART RMS)*
- Empresa:** SPEA Airport Systems Srl., SEETEK S.A.
- Sitio web:** <http://www.speairportsystems.net/SPEA-SMART-Resource-Management-System.html>
- Objetivos:** Minimizar los costes operativos, aumentar el nivel de servicio de las líneas aéreas / agentes de handling / pasajeros, minimizar la congestión en el aeropuerto, y mejorar la respuesta del aeropuerto a eventos no planificados o cuando no hay disponibilidad de los recursos específicos.
- Descripción:** El SMART RMS se utiliza para optimizar la utilización de los recursos del

aeropuerto, es decir, trabajadores, recursos móviles, cintas de recogida de equipajes y puertas de embarque, asegurando que los recursos adecuados estén disponibles en el momento oportuno y en el lugar específico. El SMART RMS genera automáticamente la solución óptima de asignación de recursos basada en:

- La información más reciente de vuelo como la llegada de aviones / hora de salida y las posiciones de estacionamiento de aeronaves en la plataforma.
- La disponibilidad y la posición de los equipos de asistencia en tierra y personal.
- Asignación inteligente y algoritmos de optimización.
- Restricciones definidas por el servicio.

SMART RMS pertenece al sistema “*SMART Airport Management Systems*” (SMART AMS), por lo que es compatible con otros componentes de SMART AMS, como “*SMART Airport Data Management Systems*”, “*SMART Airport Passenger and Baggage Management Systems*” y “*SMART Airport Technology Support Systems*”.

Fortalezas del producto: Reasignación automática de recursos en caso de cambios de vuelo y actualización de la disponibilidad de recursos.

Integración: El cumplimiento de las normas internacionales de Asociación del Transporte Aéreo.

Referencias: -

3.2.4 Airport Planning and Scheduling Tool

Nombre: *Airport Planning and Scheduling tool*

Empresa: Quintiq

Sitio web: <http://www.quintiq.com/>

Objetivos: Minimizar los costes operativos, aumentar el nivel de servicio de las líneas aéreas / agentes de handling / pasajeros, minimizar la congestión en el aeropuerto y mejorar la productividad del personal del aeropuerto y de los operadores de handling.

Descripción: *Airport Planning and Scheduling tool* se utiliza para optimizar la utilización de los recursos del aeropuerto mediante la resolución de problemas en un entorno dinámico:

- Aeropuertos: la programación de los recursos de asistencia en tierra, las puerta de embarque, las posiciones de parking y los mostradores

de facturación.

- Aerolíneas: planificación de rutas, programación de la tripulación, gestión de flotas y mantenimiento de la flota.
- El control del tráfico aéreo: planificación estratégica de la capacidad, programación de los horarios de los trabajadores y de los tiempos de descanso.

La aplicación permite tener en cuenta las necesidades especiales de las líneas aéreas y de las zonas de facturación y las puertas de embarque.

Fortaleza del producto: Optimización de la programación en tiempo real.

Integración: Permite la integración con los sistemas actuales del aeropuerto.

Referencias: Aeropuerto de Bruselas, Transavia, KLM Catering Services, DFS and NAV CANADA

3.2.5 UltraResource

Nombre: UltraResource

Empresa: Ultra Electronics

Sitio web: <http://www.ultra-as.com/products-solutions/ultraresource/>

Objetivos: Minimizar los costes operativos y proporcionar flexibilidad operacional.

Descripción: UltraResource optimiza la utilización de los recursos del aeropuerto, incluyendo las posiciones de parking, cintas de recogida de equipaje, puertas de embarque y los mostradores de facturación. El uso optimizado de recursos se logra mediante la utilización de un sistema experto, proporcionando un conjunto de algoritmos que permiten evaluar la asignación de recursos potenciales de acuerdo a un conjunto de reglas definidas por el usuario. Estas reglas incluyen restricciones, tales como limitaciones físicas, consideraciones de marketing y las preferencias de las aerolíneas / agentes de handling. La optimización se lleva a cabo a través de un conjunto integrado de módulos, como *Stand Planner*, *Gate Planner*, *Check-in Planner* y *Baggage Belt Planner*. El módulo *Stand Planner* se utiliza para planificar y vigilar el movimiento real de las aeronaves en tierra. El módulo *Gate Planner* se utiliza para asignar los vuelos de salida a las puertas de embarque y para dar apoyo a las operaciones para puestos de estacionamiento remoto. *Check-in Planner* permite asignar mostradores de facturación a aerolíneas y / o agentes de handling. *Baggage Belt Planner* asigna cintas de equipaje para los vuelos de llegada. El proceso de adjudicación puede llevarse a cabo de forma

automática o manual.

Fortaleza del producto: Es un *Expert System* basado en la planificación y consideración de acontecimientos imprevisibles operacionales.

Integración: Permite la integración con *Ultra Electronics Airport Systems*.

Referencias: Aeropuerto de Oakland International.

3.2.6 PAX2SIM

Nombre: PAX2SIM

Empresa: SIMCORE

Sitio web: <http://www.pax2sim.com>

Objetivos: Maximizar la utilización de los recursos del aeropuerto.

Descripción: El PAX2SIM se utiliza para el *master planning* del aeropuerto, planificar la capacidad de la terminal de pasajeros, optimización y diseño del área de recogida de equipajes y optimización de las operaciones de handling. Esta herramienta también se puede utilizar para optimizar la eficiencia de los controles de seguridad mediante la comparación de diferentes escenarios posibles.

Fortaleza del producto: Previsión de la demanda sobre la base de la programación de vuelos, retraso en llegadas / salidas y otros cambios. La programación de llegada de los pasajeros al aeropuerto puede ser generada basándose en la observación de las características de los pasajeros durante un determinado período de tiempo.

Integración: Permite la integración con el software de simulación 3D AutoMod.

Referencias: Athens International Airport.

3.2.7 AutoMod™ Product Suite (AutoStat Module)

Nombre: AutoMod™ Product Suite (AutoStat Module)

Empresa: Applied Materials (AutoSimulation)

Sitio web: <http://www.appliedmaterials.com>

Objetivos: Minimizar costes operativos, aumentar el nivel de servicio de las líneas aéreas / agentes de handling / pasajeros y minimizar la congestión en el aeropuerto teniendo en cuenta diferentes horarios de vuelo.

Descripción: El AutoMod™ Product Suite se utiliza para modelar, analizar y optimizar las operaciones de manejo de equipaje y carga, operaciones en la pista y el movimiento de aeronaves, así como el flujo de pasajeros en los mostradores de facturación, puertas de embarque y controles de seguridad. En particular,

este producto se puede utilizar para analizar colas y cuellos de botella en los aeropuertos, para el análisis de la capacidad de los vehículos / remolques y los niveles de servicio en contra de la programación de vuelos que varían, así como optimizar la utilización de los recursos del aeropuerto. El TM AutoMod permite el desarrollo de modelos de simulación específicos mediante la inclusión de detalles, como por ejemplo las características concretas de un equipaje (estado, clase, transferencia y número de vuelo), la probabilidad de fallo en los equipos, los tiempos de tránsito, los tiempos de recuperación, entre otras.

El AutoMod TM Product Suite incluye el software de simulación AutoMod3D, el módulo AutoStat, el módulo de AutoView y Módulo de Comunicaciones (MCM). El software de simulación AutoMod3D permite la simulación de eventos discretos y continuos de los procesos terrestres y aéreos. El módulo AutoStat se utiliza para el análisis estadístico (determinación del período de calentamiento, el diseño de experimentos, la estimación de los intervalos de confianza) y la optimización basada en la estrategia de evolución. El AutoView se utiliza para crear animaciones en formato de archivo de audio y vídeo AVI. Y finalmente, el MCM enlaza modelos a otros programas.

Fortaleza del producto: Permite la simulación en paralelo y de forma distribuida. Modelado muy detallado y preciso de los procesos terrestres y aéreos.

Integración: Integrado en el AutoModTM Product Suite.

Referencias: -

3.2.8 OptQuest

Nombre: OptQuest

Empresa: OptTek Systems

Sitio web: <http://www.opttek.com/Products/OptQuest.html>

http://www.arenasimulation.com/Products_OptQuest.aspx

Objetivos: Minimizar costes, aumentar el nivel de servicio de las líneas aéreas / agentes de handling / pasajeros, minimizar la congestión en el aeropuerto, mejorar la asignación de flotas y mejorar las respuestas ante emergencias.

Descripción: El OptQuest utiliza los algoritmos “*tabu search*”, “*scatter search*” y “*integer programming*” con el fin de encontrar una solución casi óptima, reduciendo al mínimo / máximo el rendimiento de los parámetros seleccionados (por ejemplo, los costes, tiempos de utilización de recursos, número de pasajeros de salida, etc.)

Se utilizan Redes Neuronales Artificiales (ANN-based) meta-modelado, con el fin de sustituir tiempo de simulación de experimentos de optimización y evaluar el buen funcionamiento del modelo. La herramienta es compatible con optimización multi-objetivo de tres maneras: (1) suma ponderada basada en la optimización, (2) la optimización de la programación basada en objetivos, y (3) la optimización de Pareto de primera base. El OptQuest permite la definición de los límites inferior y superior de las variables de decisión, y la introducción de limitaciones en las medidas de desempeño.

Fortaleza del producto: Permite la optimización multi-objetivo y el procesamiento en paralelo de la simulación de escenarios.

Integración: El OptQuest es compatible con las siguientes herramientas de simulación: *Enterprise Dynamics (ED) Airport Suite*, *Arena Airport Suite*, ProModel, AnyLogic y Flexsim.

- *Enterprise Dynamics (ED) Airport Suite* (INCONTROL Simulation Solutions, <http://www.incontrolsim.com/de/ed-airport/ed-airport.html>) incluye las siguientes bibliotecas de objetos de simulación: (1) BaxSim – el entorno de la zona de recogida de equipajes, (2) PaxSim - el entorno de la terminal de pasajeros, (3) Stand Allocation- el entorno de planificación de puertas de embarque, (4) TransSim - accidentes de tráfico y medio ambiente (5) logística - la carga y la logística general.
- *Arena Airport Suite* (Rockwell Automation, <http://www.arenasimulation.com>) se utiliza para simular los planes de viaje, “*airport master planning*”, la terminal de pasajeros, las operaciones de handling, los negocios ajenos a la aviación y los sistemas de la zona de operaciones. Está formado por seis módulos que son *Airport Data Management*, *Flight Schedule Prognosis*, *Airport Master Planning*, *Passenger Terminal Simulation*, *Non-Aviation Business Analysis* y *Baggage Handling Simulation*. Ofrece una simulación muy realista de los procesos terrestres y la zona de operaciones que se logra mediante el uso de bloques lógicos de proceso, tales como el área de seguridad para el equipaje, controles de seguridad de embarque, etc.
- ProModel (PROMODEL Corporation, <http://www.promodel.com>) se puede utilizar en combinación con la optimización y el análisis estadístico de complementos para mejorar el handling de equipaje y la

seguridad en los aeropuertos, así como para optimizar el rendimiento en determinadas áreas, la utilización de las instalaciones, respuesta de emergencia, la flota y la asignación de recursos.

- AnyLogic (XJTechnologies, <http://www.xjtek.com>) se puede utilizar en combinación con el OptQuest para optimizar la utilización de los recursos aeroportuarios (recursos móviles e inmóviles: mostradores de facturación, la inmigración, los controles de seguridad, etc).
- Flexsim (Productos Flexsim Software, <http://www.flexsim.com>) se puede aplicar a diferentes tipos de modelado en 3D de los procesos terrestres y aéreos. La funcionalidad de la Flexsim se puede ampliar mediante el uso de bibliotecas dinámicas.

Referencias: Aeropuerto Schiphol de Ámsterdam, Holanda Control de Fronteras (Koninklijke Marechaussee), King Abdulaziz Aeropuerto Internacional.

3.2.9 SimRunner

Nombre: SimRunner

Empresa: PROMODEL Corporation

Sitio web: <http://www.promodel.com/products/simrunner/>

Objetivos: Minimizar costes, aumentar el nivel de servicio de las líneas aéreas / agentes de handling / pasajeros, minimizar la congestión en el aeropuerto y mejorar la respuesta de emergencia.

Descripción: El *SimRunner* aplica “*genetic algorithm*” y “*evolution strategy*” a un modelo de simulación con el fin de encontrar una solución aproximada, reduciendo al mínimo / máximo las medidas de rendimiento seleccionadas. De igual manera que el OptQuest, el *SimRunner* también utiliza meta-modelado basado en Redes Neuronales Artificiales (ing. ANN) para minimizar los tiempos de simulación y optimización. Múltiples medidas de desempeño se agregan en una suma ponderada a través de la asignación de los coeficientes de ponderación a cada uno de ellos. La herramienta permite la definición de los límites inferior y superior de las variables de decisión, pero no permite la introducción de limitaciones a las medidas de desempeño.

Fortaleza de producto: Aplicación de algoritmos evolutivos y ANN para la búsqueda de soluciones casi óptimas.

Integración: El *SimRunner* es compatible con el software de simulación ProModel.

Referencias: -

3.2.10 WITNESS Optimizer

Nombre: WITNESS Optimizer

Empresa: Lanner Group

Sitio web: <http://www.lanner.com/en/media/witness/optimiser.cfm>

Objetivos: Minimizar costes operativos, aumentar el nivel de servicio de las líneas aéreas / agentes de handling / pasajeros y minimizar la congestión en el aeropuerto.

Descripción: El WITNESS Optimizer aplica el algoritmo "Adaptive Thermostatistical Simulated Annealing", que incluye algunos elementos del algoritmo "tabu search". La herramienta se ha mejorado con un algoritmo de "Six Sigma" para identificar las mejores zonas y las opciones disponibles para la mejora de procesos específicos.

Fortalezas del producto: Tiempo-eficacia.

Integración:

Enlace directo a la exportación del software MINITAB Statistical para su análisis en profundidad, y enlaces directos de los dos hacia Microsoft Excel. Integrado con el software de simulación WITNESS permite el modelado de aeronaves, carga, equipaje y el flujo de pasajeros, teniendo en cuenta la programación de llegadas / salidas de aviones.

Referencias: Air France, Aeropuerto de Barajas Madrid, Heathrow Airport, Liverpool John Lennon Airport, Virgin Atlantic Airlines.

3.2.11 FICO Xpress Optimization Suite

Nombre: FICO Xpress Optimization Suite

Empresa: FICO

Sitio web: <http://www.fico.com>

Objetivos: Resolver diferentes tipos de problemas de planificación y programación.

Descripción: FICO Xpress Optimization Suite permite la modelización matemática y la optimización, a gran escala, de los problemas del mundo real. Incluye tres módulos de optimización: Xpress-Optimizer, SLP-Xpress y Xpress Kalis. Xpress-Optimizer utiliza los métodos Simplex primal y dual. Xpress-SLP aplica técnicas de aproximación lineal para resolver problemas no lineales. Y Xpress-Kalis se utiliza para resolver problemas combinatorios discretos formulados como modelos de programación con restricciones.

Los optimizadores requieren la formulación de los problemas utilizando modelos Mosel y lenguaje de programación.

- Fortalezas del producto:** Aplicables a los problemas con millones de variables y restricciones. Apoyo de paralelismo para explotar varios núcleos de CPU.
- Integración:** Compatible con el estándar de la industria LP (Linear Programming) y MPS (Mathematical Programming System).
- Referencias:** American Airlines.

3.2.12 IBM ILOG CPLEX Optimizer

- Nombre:** IBM ILOG CPLEX Optimizer
- Empresa:** IBM ILOG
- Sitio web:** <http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-cp-optimizer/>
- Objetivos:** Resolver diferentes tipos de problemas de planificación y programación.
- Descripción:** ILOG CPLEX Optimizer es un componente de IBM ILOG CPLEX Optimization Studio y contiene los algoritmos Simplex para resolver los problemas formulados como modelos de programación matemática o de programación con restricciones.
- Fortaleza del producto:** Aplicables a los modelos de gran tamaño (más de dos mil millones de elementos) y las funciones cuadráticas y no convexas. Permite el procesamiento en paralelo.
- Integración:** Permite la integración de aplicaciones externas programadas en Java, C++ o .NET (mediante interfaces de programación de aplicaciones (API)).
- Referencias:** United Parcel Service Airlines, United Airlines.

3.2.13 CAST

- Nombre:** CAST
- Empresa:** Airport Research Center GmbH
- Sitio web:** <http://www.airport-consultants.com>
- Objetivos:** Minimizar los tiempos de asistencia de las aeronaves, maximizar la utilización de los recursos móviles e inmóviles y aumentar el nivel de servicio de las líneas aéreas / agentes de handling / pasajeros.
- Descripción:** CAST es un sistema de simulación 3D multi-agente que permite modelar y analizar los movimientos de pasajeros en la terminal (*CAST Terminal*), el tráfico de vehículos en el aeropuerto (*CAST Aircraft*), así como la zona de operaciones de tráfico de vehículos y asistencia en tierra (*CAST Vehicle*). A parte dispone de softwares adicionales, tales como *CAST GroundHandling*, *CAST ApronControl*, etc.
- Para programar los recursos móviles se pueden utilizar los módulos de CAST

Vehicle y *CAST GroundHandling*. El *CAST Vehicle* incorpora un sofisticado modelado basado en la generación de tráfico dinámico que tiene en cuenta la información específica de cada vuelo, la situación del tráfico en los virajes, así como las responsabilidades individuales y sus estrategias corporativas. Además, el *CAST Vehicle* proporciona un modelado preciso del comportamiento de conducción microscópico teniendo en cuenta las propiedades cinemáticas y dinámicas de los vehículos. Por otro lado, el *CAST GroundHandling* permite la simulación dinámica y el análisis de los movimientos de vehículos de handling con el fin de identificar cuellos de botella potenciales, resolver las colisiones y acelerar procesos de planificación y decisión. Esta herramienta se puede utilizar para verificar la compatibilidad de las aeronaves y equipos de asistencia en tierra.

Tanto el *CAST Vehicle* como el *CAST GroundHandling* permiten al usuario definir las distintas medidas de rendimiento para un amplio análisis online y offline.

Fortaleza del producto: Se pueden modelar los retrasos de las aeronaves usando funciones de distribución de la probabilidad. Soporta una base de datos que contiene los servicios requeridos por cada compañía aérea y tipo de avión. Animación en 3D y permite crear y modificar diferentes tipos de escenarios.

Integración: Integrado en la familia de productos CAST.

Referencias: BAA, Frankfurt Airport, Zurich Airport, etc. http://www.airport-consultants.com/index.php?option=com_content&view=section&id=12&Itemid=81

3.2.14 SITA WorkBridge RMS

Nombre: SITA WorkBridge Resource Management System (SITA WorkBridge RMS)

Empresa: SITA

Sitio web: <http://www.workbridge.com>
<http://www.sita.aero/product/resource-management-system>

Objetivos: Minimizar los tiempos de asistencia de las aeronaves y maximizar la utilización de los recursos móviles e inmóviles.

Descripción: SITA Workbridge RMS aplica la base de reglas "rule base" y sofisticados algoritmos de optimización para encontrar soluciones óptimas y la asignación de los recursos móviles e inmóviles, teniendo en cuenta la información de vuelo en tiempo real, el estado de los trabajadores de handling, las habilidades, los tiempos de desplazamiento, etc. Las decisiones se toman a través de diversas variables (por ejemplo, retrasos de vuelos, cancelaciones,

vuelos no regulares, cambio de llegadas y salidas de aviones). La herramienta permite el análisis "*what if*" basado en el uso de la tecnología de simulación. Permite además, la toma de decisiones inteligentes en tiempo real partiendo de la información ofrecida por el operador con el fin de resolver conflictos reales o potenciales presentando varias soluciones para resolverlas.

SITA Workbridge RMS se compone de varios módulos que son, *PlanManager*, *RosterManager*, *StaffManager*, *TimeManager*, *RealTimeManager*, *MobileManager* y *ReportManager*.

Fortalezas del producto: Estructura modular, implementación ágil, capacidad para personalizar las soluciones y múltiples funcionalidades.

Integración: SITA RMS se puede utilizar independientemente o como un componente totalmente integrado de *SITA Airport Management Solution*.

Referencias: Istanbul Sabiha Gökçen International Airport, Caribbean airport.

3.3 Conclusiones

Numerosos métodos y software se han estudiado para resolver los problemas de programación de proyectos, o lo que es lo mismo en este caso concreto, la programación de las actividades involucradas en las escalas de las aeronaves en los aeropuertos.

Con el fin de obtener una solución óptima y factible, es importante la aplicación de un método del tipo "*multi-project*", en los que se ayuda a cada proyecto a alcanzar sus propios objetivos, teniendo en cuenta toda una serie de restricciones. La mayoría de las soluciones resultan de una mayor efectividad del uso del tiempo, de los recursos disponibles y de unos costes más óptimos.

Además, no hay que dejar de lado las incertidumbres, que son las causantes, en la mayoría de los casos, de que las duraciones de las actividades se incrementen, y en consecuencia, sus costes. De ahí, que numerosos métodos se hayan enfocado en el cálculo de ventanas de tiempo que puedan absorber tales perturbaciones, y al mismo tiempo, minimizar los costes provocados por el tiempo adicional.

Así pues, con el objetivo de realizar una programación eficiente, es imprescindible definir previamente los objetivos a alcanzar, las variables de decisión, las restricciones, etc.

CAPÍTULO 4

Definición del problema de la programación de la asistencia en tierra

Para poder obtener una visión más clara del problema a modelar, es imprescindible realizar un modelo matemático del problema de la programación de los servicios de handling.

Para ello, se han definido y desarrollado los siguientes elementos:

Notación:

a : Vuelo;

e : Equipo de handling;

s : Servicio de handling;

t : Instante de tiempo;

q_e^t : Cantidad disponible del recurso e_r en el instante t ;

$te_{i,j}$: Tiempo de ejecución del servicio s_i en el vuelo a_j ;

$x_{i,j}^-$: Tiempo de inicio programado del servicio s_i en el vuelo a_j ;

$x_{i,j}^+$: Tiempo de finalización programado del servicio s_i en el vuelo a_j ;

$\widehat{x}_{i,j}^+$: Tiempo de finalización actual;

$t_{i,j}$: Tiempo de recorrido de un equipo de handling del vuelo i al vuelo j ;

$q_{s,e}^t$: Cantidad que requiere el servicio s_i del equipo e_r en el instante t ;

c_j : Coste de retraso del vuelo a_j ;

dl_j : Tiempo de retraso del vuelo a_j ;

$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$: Conjunto de n vuelos;

$E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$: Conjunto de m equipos de handling;

$S = \{s_1, s_2, \dots, s_l\}$: Conjunto de l servicios de handling;

T : Tiempo de programación;

4.1 Supuestos a considerar

Cada vuelo $a \in A$ requerirá de una serie de servicios (S) para realizar su escala en el aeropuerto, y para cada $s \in S$ se necesitará una serie de equipos de handling (E), de los cuales, para cada $e \in E$ se dispone de una determinada cantidad q_e^t en el instante t .

Ahora bien, se considerará el retraso de las llegadas de las aeronaves de forma estocástica (incertidumbre 2.1), además de considerar el estado de la rampa congestionado, por lo que algunos recursos estarán saturados (incertidumbre 2.6).

Por otro lado, los tiempos de ejecución de los servicios ($te_{i,j}$) se considerarán estocásticos.

Así pues, los tiempos de finalización actual ($\hat{x}_{l,j}^+$), los cuales están sometidos a las llegadas de las aeronaves y a la ejecución de los servicios, se modelaran de forma estocástica también.

4.2 Funciones objetivo

Se consideraran las siguientes funciones objetivo:

$f_1 = \min \sum_{j \in J} c_j dl_j$: Minimizar el coste de retraso de las aeronaves.

$f_2 = \min \sum_{i,j \in J} t_{ij}$: Minimizar el tiempo total de recorrido entre las posiciones de estacionamiento.

En el que c_j es el coste de retraso del vuelo a_j y dl_j supone el tiempo de retraso, el cual vendrá determinado por el tiempo de finalización de la última actividad a realizar ($x_{l,j}^+$):

$$dl_j = \hat{x}_{l,j}^+ - x_{l,j}^+$$

4.3 Variables de decisión

$x_{i,j}^-$ = Tiempo de inicio programado del servicio s_i en el vuelo a_j ;

4.4 Restricciones

1. Restricción de precedencia (5.1): $x_{s,j}^- + te_{s,j} \leq x_{s+1,j}^-$ para todo $s \in S$, en caso que s deba estar acabado para comenzar $s+1$.
2. Restricción temporal (5.2): $x_{s,j}^- \geq 0$ para todo $s \in S$.
3. Restricción de recursos (5.3): $\sum_{s \in S} q_{s,e}^t \leq q_e^t$ para todo $e \in E$ y para todo $t \in T$.

4.5 Conclusiones

Todo este modelo matemático se ha realizado para ayudar en el diseño y la elaboración del modelo de simulación, además de definir las variables, funciones objetivo y restricciones, que serán consideradas por el algoritmo de optimización.

CAPÍTULO 5

Desarrollo del modelo de simulación de la asistencia en tierra

Con el fin de desarrollar un modelo de simulación que sea eficiente y con el que se pueda analizar las programaciones del handling bajo ciertas incertidumbres, se debe primero que nada, tener presente el problema, tal y como está definido en el apartado 4, además de definir las escalas de las aeronaves y sus respectivos tiempos de ejecución, considerando tiempos distintos para diversos tipos de aeronaves (*light*, *medium* o *high*). Así como desarrollar el *flowchart* del modelo a simular.

5.1 Tipo de escala

La escala considerada para implementar en el modelo, es una escala compuesta por las siguientes actividades y servicios, observados en la figura 5.1:

1. Llegada de la aeronave (conexión con la pasarela o “*finger*”).
2. Desembarque de pasajeros.
3. Descarga del equipaje.
4. Carga de equipaje.
5. Servicio de agua potable.
6. Servicio de aguas residuales.
7. Suministro de combustible.
8. Limpieza de la cabina.
9. Servicios de catering.
10. Embarque de pasajeros.

11. Salida de la aeronave (Desconexión con la pasarela y “push-back”).

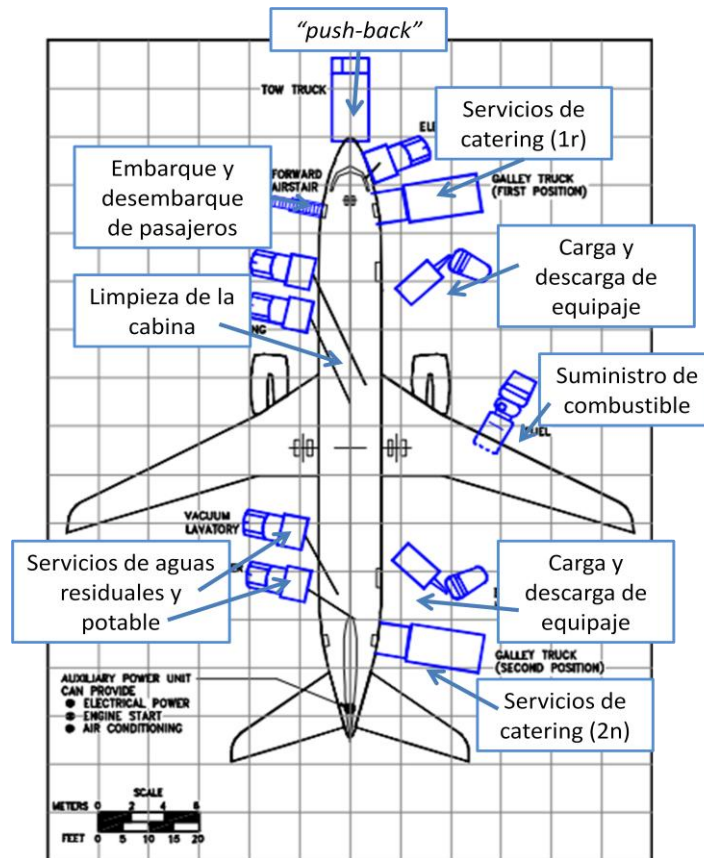


Figura 5.1: Escala de la aeronave

A continuación, en la figura 5.2 es posible apreciar la relación entre las actividades, es decir, que actividades pueden llevarse a cabo de manera simultánea (paralelas) o que restricciones de precedencia hay. Por otro lado, es posible apreciar en un principio, el camino crítico de la escala, que lo componen todas aquellas actividades cuyo retraso causa un retraso general en la escala.

Dicho camino crítico está compuesto por las siguientes actividades:

1. Conexión con la pasarela → 2. Desembarque de pasajeros → 9. Servicios de Catering → 10. Embarque de pasajeros → 11. Desconexión con la pasarela y “push-back”.

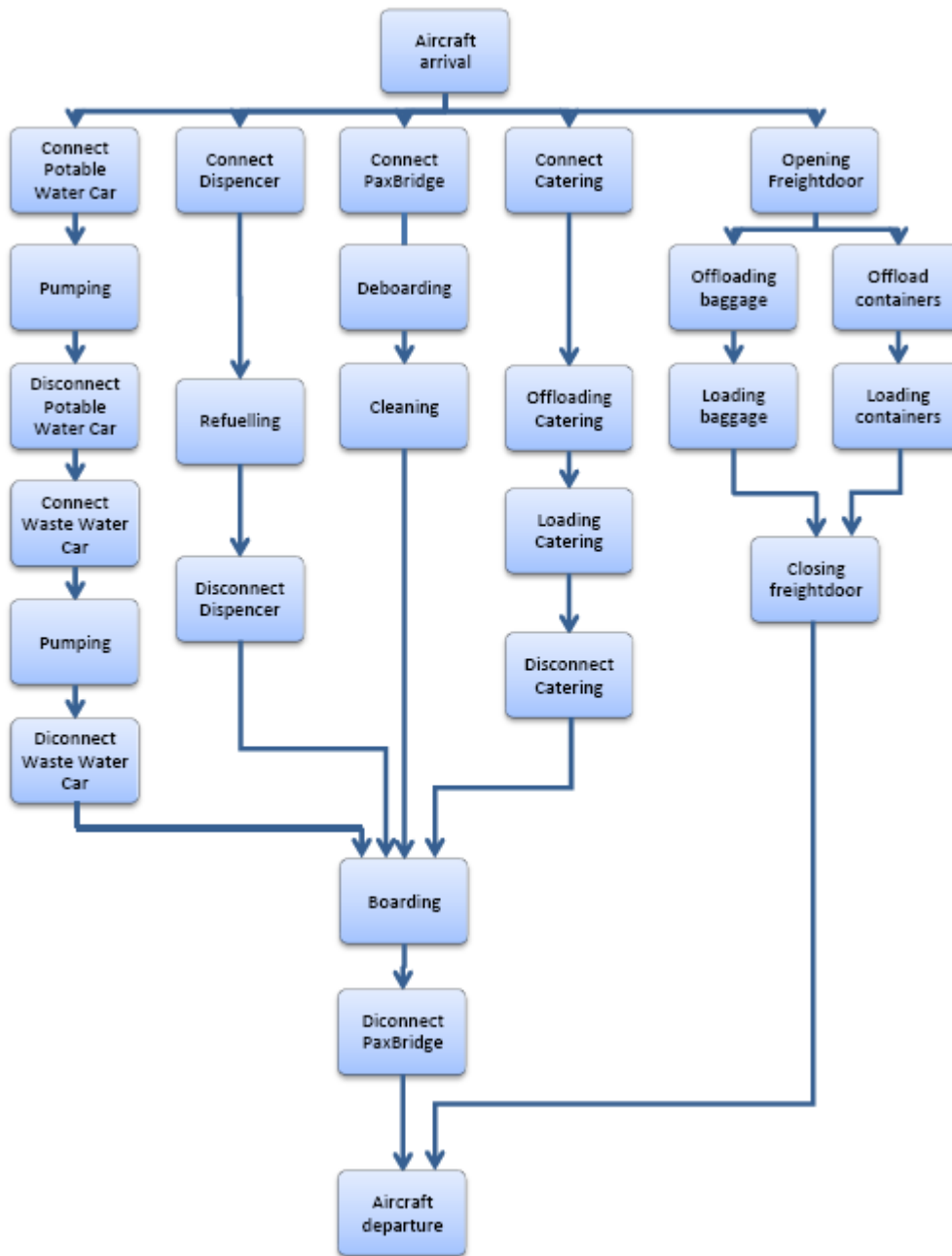


Figura 5.2: Relación de las actividades que componen la escala de la aeronave [20]

Ahora bien, los tiempos de ejecución considerados para las actividades, son tiempos constantes a los que se les puede aplicar pequeñas variaciones durante la ejecución del modelo. No obstante, difieren entre ellos en cuanto a tipos de aeronaves. Por ello, se diferenciarán las aeronaves entre aeronaves “high” (de largo recorrido) y aeronaves “light” o “medium” (de corto y medio alcance).

Así pues, los tiempos de ejecución según el tipo de aeronave serán los siguientes:

Tipo de aeronave Actividad	L	M	H
Conexión con la pasarela	1	1	1
Desembarque de pasajeros	4	8	12
Descarga del equipaje	7	11	22
Carga del equipaje	10	18	26
Agua potable	5	6	17
Aguas residuales	6	10	21
Combustible	7	13	29
Limpieza de la cabina	7	13	32
Catering	10	15	32
Embarque de pasajeros	10	15	20
Desconexión con la pasarela	1	1	1
"push-back"	2	2	2
TOTAL	28	42	68

Tabla 5.1: Tiempos de ejecución¹

5.2 “Flowchart” del modelo

El “flowchart” es un diagrama que representa un proceso, mostrando todos los pasos a seguir y su relación. Para la realización del *flowchart* del modelo se ha considerado las restricciones de precedencias mostradas con anterioridad.

A continuación se detallan los pasos a seguir en el modelo:

5.2.0 INICIO

Representa el inicio de la simulación.

5.2.1 Llegada

Momento en el que llega una aeronave.

5.2.1.1 ¿Pasarelas disponibles?

Decisión en el que se verifica el número de puertas de embarque disponibles para llevar a cabo la escala de la aeronave. En el modelo, el número total de puertas de embarque son tres.

¹ Unidades de tiempo en minutos.

5.2.1.2 Esperar una pasarela disponible

En caso que la decisión 5.2.2 sea NO, la aeronave procederá a “esperar” hasta que una pasarela quede libre para su uso, dicho de otra manera, se aumentará el retraso de la aeronave.

5.2.2 Conectar pasarela

En caso que la decisión 5.2.2 sea SÍ, se conectará la pasarela disponible a la aeronave. Desde este momento, se podrán realizar los siguientes cinco pasos:

5.2.3 Descargar equipaje

Se descarga el equipaje y demás mercancías en la bodega del avión.

5.2.3.1 Cargar equipaje

Una vez concluido el paso 5.2.4.1, se carga el equipaje y demás mercancías en la bodega del avión.

5.2.4 Cambio de agua potable

Se llena el depósito de agua potable del avión.

5.2.4.1 Recogida de aguas residuales

Una vez realizado el paso 5.2.4.2 se procede a extraer las aguas residuales, procedente en su mayoría de los aseos, y almacenada en un depósito.

5.2.5 Desembarque de pasajeros

Desembarque de todos los pasajeros a bordo de la aeronave. Una vez se haya realizado este paso, se podrán llevar a cabo las siguientes tareas, las cuales requieren de una aeronave libre de pasajeros:

5.2.5.1 Catering

Se procede a la descarga y carga del catering de a bordo, ya sean productos alimenticios o productos de venta, auriculares, etc.

5.2.5.2 Limpieza de cabina

Implica la limpieza general de la cabina de pasajeros. Su tiempo de ejecución, prácticamente abarca el tiempo entre el desembarque y el embarque.

5.2.5.3 Suministrar combustible

Se procede a realizar el suministro del combustible a la aeronave.

5.2.6 Embarque de pasajeros

Una vez todas las demás actividades se hayan realizado satisfactoriamente, con sus respectivos tiempos de ejecución, se procede al embarque de la aeronave.

5.2.7 Desconectar pasarela

Finalizado el embarque, se desconecta la pasarela para que la aeronave pueda marchar.

5.2.8 “Push-Back”

Supone el empuje hacia atrás del avión, mediante un tractor conectado a las ruedas delanteras de la aeronave.

5.2.9 Salida

Momento de salida de una aeronave.

5.2.9.1 ¿Más aeronaves?

Tercera y última decisión, en la que se comprueba la llegada de otras aeronaves. En caso afirmativo, se procederá a realizar el proceso desde el paso 5.2.1 (llegada).

5.2.10 FIN

Sin embargo, en caso negativo, se concluirá la simulación.

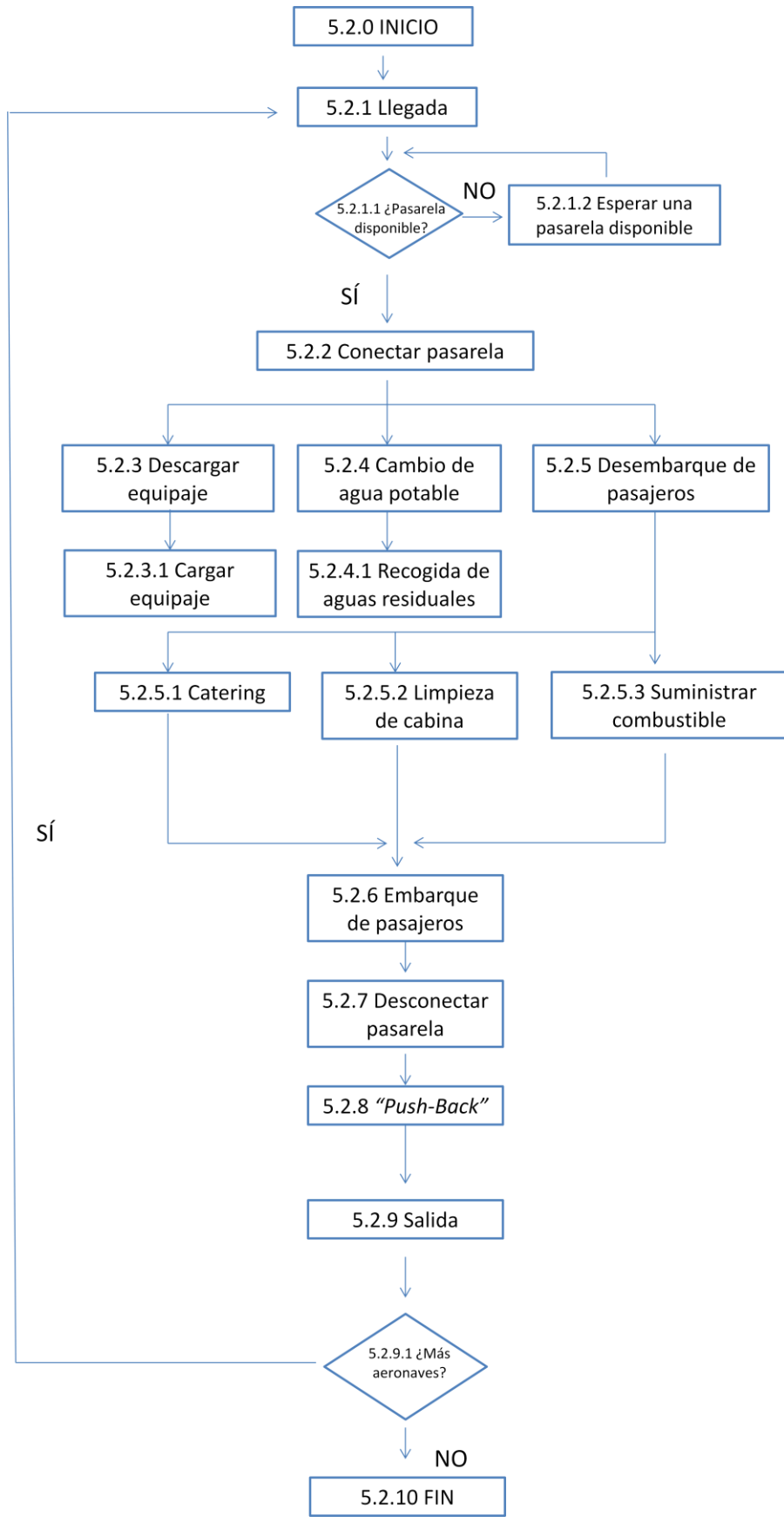


Figura 5.3: "Flowchart" del modelo

5.3 Modelo de simulación con SIMIO

Para la simulación de la asistencia en tierra se ha empleado la herramienta de simulación Simio Enterprise Edition, y como escenario la terminal T2 del aeropuerto de Barcelona:

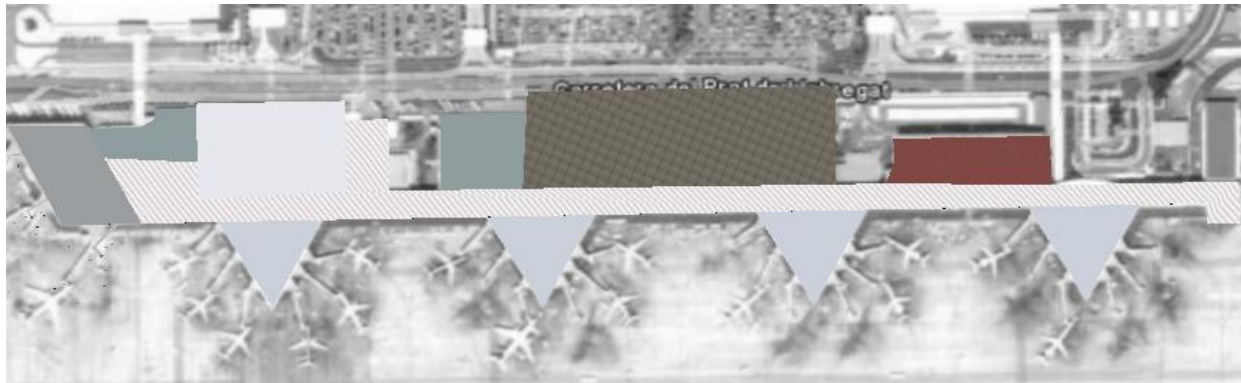


Figura 5.4: Disposición de la terminal T2 del aeropuerto de Barcelona

Toda la información input utilizada en el modelo ha sido en su mayoría datos reales, proporcionados por la empresa Aslogic, con la que se ha colaborado para la realización del presente proyecto.

Esta información se ha distribuido para su uso en el modelo en siete tablas de datos, las cuales obtenían la información a través de ficheros externos de Excel. Su denominación en el modelo de simulación fue la siguiente:

- *Llegadas*: Se obtenía la hora de llegada de la aeronave, su destino dentro de la zona de rampa, es decir, la posición de parking y el retraso que llevaba. Además, de otra información referente al vuelo.
- *Aircrafts*: Tipo de aeronave.
- *Airlines*: Información relacionada con las aerolíneas que operaban el vuelo.
- *Resources*: Recursos disponibles para realizar las operaciones de handling.
- *Handling*: Relacionaba el tipo de aeronave con el tipo de operación a llevar a cabo, para obtener los tiempos de ejecución de las actividades.
- *Destination*: Relacionaba la posición de parking de la aeronave con el tipo de operación, para indicar el destino de los recursos de handling dentro de la posición de parking, es decir, indicar a cada recurso que operación hacer.

- HandlingSchedule*: Esta última tabla muestra el resultado obtenido tras la integración del modelo con la herramienta “groundHRS”, explicada en el siguiente apartado. No obstante, supondría la programación inicial óptima de los recursos según la información contenido en las otras tablas.

Dejando de lado la información input, que será explicada más en detalle en el capítulo 7, para el modelo de simulación se consideraron tres posiciones de parking, cuyas puertas de embarque están ubicadas en el módulo 5 (M50, M51 y M52).

Por otro lado, para simular las operaciones se han utilizado distintos “servers” (uno para cada tipo de actividad) para intentar que los recursos se moviesen lo más realista posible:

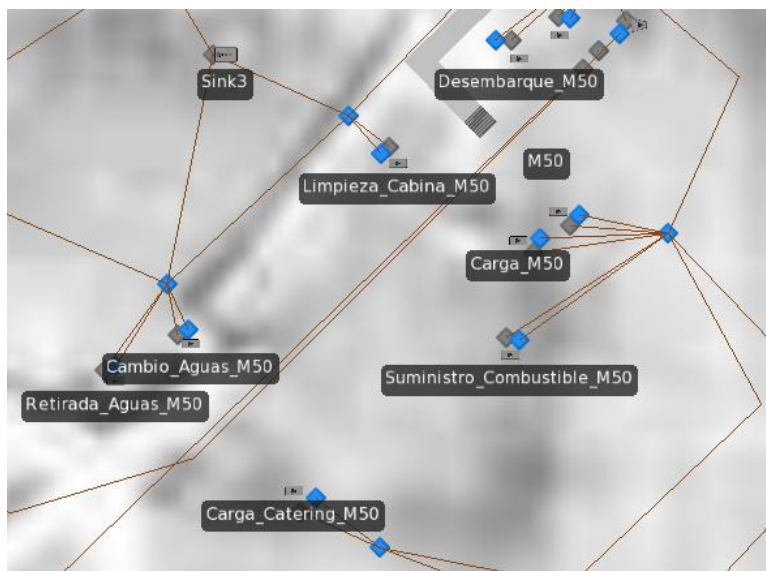


Figura 5.5: Servers en la escala

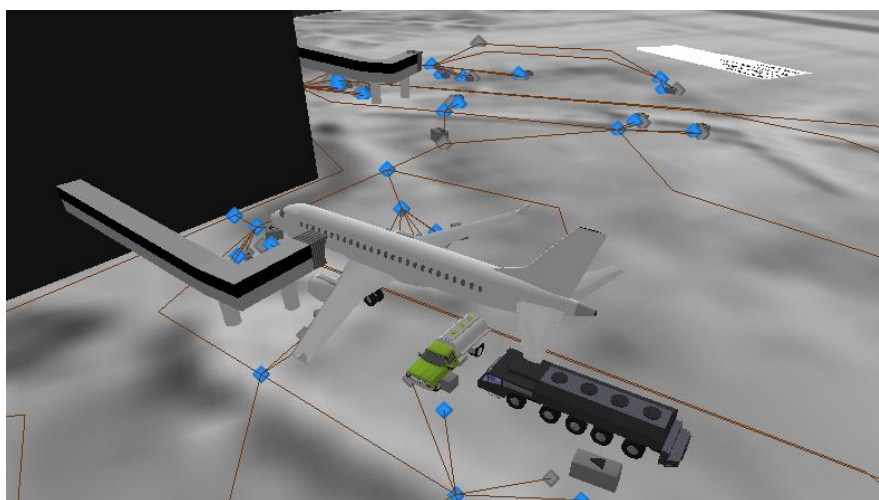


Figura 5.6: Ejemplo de la escala de una aeronave de tipo “medium”

Cada uno de estos *servers* tiene asignado un tiempo de proceso, dependiendo del tipo de aeronave y derivado de la tabla *Handling*, y unos procesos de espera según las restricciones de precedencia. Además, algunos de ellos asignan una serie de estados, con la finalidad de transmitir información sobre el vuelo que está realizando la escala. Por ejemplo, el vuelo SWT151 de la compañía Swiftair (SWT):

Aerolínea: **Swiftair**
 Código ICAO: **SWT**
 Número de vuelo: **SWT151**
 Aeronave: **E120**

Figura 5.7: Ejemplo de estados de información

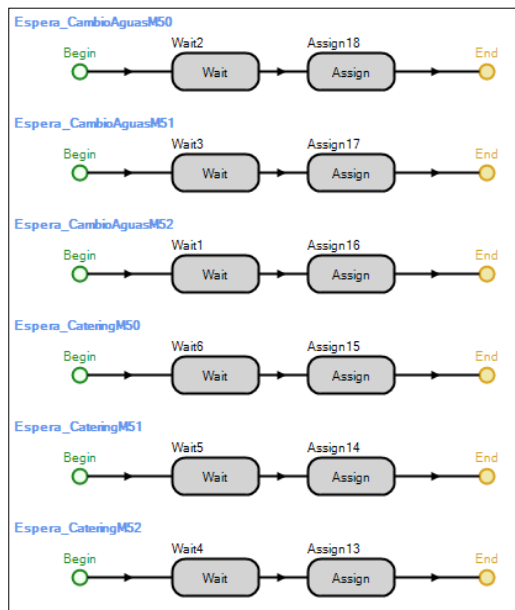


Figura 5.8: Procesos

Abstr	airline	String State Variable	airline
Abstr	codigo_ICAO	String State Variable	codigo_ICAO
Abstr	Aeronave	String State Variable	Aeronave
Abstr	N_de_vuelo	String State Variable	N_de_vuelo
Abstr	airline_M51	String State Variable	airline_M51
Abstr	codigoICA0_M51	String State Variable	codigoICA0_M51
Abstr	Aeronave_M51	String State Variable	Aeronave_M51
Abstr	N_de_vuelo_M51	String State Variable	N_de_vuelo_M51
Abstr	airline_M50	String State Variable	airline_M50
Abstr	codigoICA0_M50	String State Variable	codigoICA0_M50
Abstr	Aeronave_M50	String State Variable	Aeronave_M50
Abstr	N_de_vuelo_M50	String State Variable	N_de_vuelo_M50
Integer	IntegerState1	Integer State Variable	IntegerState1
Integer	IntegerState2	Integer State Variable	IntegerState2
Integer	IntegerState3	Integer State Variable	IntegerState3
Real	RealState1	Real State Variable	RealState1
Real	RealState2	Real State Variable	RealState2

Figura 5.9: Estados

De esta manera, el modelo consigue que la aeronave llegue al server de destino denominado *M5X* y que mediante un proceso de espera, no salga de dicho server hasta que el último server (*Embarque_M5X*) se haya llevado a cabo. Asimismo, los demás server no se ejecutan hasta que los servers de precedencia se hayan ejecutado satisfactoriamente.

Cuando la escala ha finalizado, la aeronave se dirige al *Push-Back_M5X*, la única actividad que se realiza con un “*combiner*”. Ello se debe, únicamente, por el hecho de simular, de una manera realista, el movimiento de salida de la aeronave. Así que la entidad de la aeronave se combina con la entidad del push-back y sale de retroceso hasta un “*separator*”.



Figura 5.10: Ejemplo de push-back

Todas las entidades son originadas mediante dos “*sources*”. El primero de ellos está ubicado en las pistas de aterrizaje y es el que genera las entidades de las aeronaves, según sus respectivos tiempos de llegadas (incluido el retraso) y según el tipo de aeronave que sea. Por otro lado, también les asigna el destino (posición del parking). El segundo, en cambio, se encarga de la generación de las entidades de los recursos de handling, según los tiempos de comienzo de las actividades (proporcionados por la tabla *HandlingSchedule*) y les asigna el destino. Este último *source* está ubicado en la propia terminal.

Así pues, debido a la ubicación de ambos *sources*, los tiempos de recorrido de las entidades hasta sus respectivos destinos afectan de por sí a los tiempos de inicio de las propias actividades. Además, cada entidad dispone de una determinada velocidad modelada según una distribución normal.

5.4 Conclusiones

Finalmente, se ha construido un modelo que permite el análisis de la variación de los tiempos de inicio simulados de las actividades de handling según los tiempos de inicio programados previamente. Todo ello, no obstante, depende en gran medida de la información input que se utilice y sobre todo del fichero proporcionado por la herramienta “*groundHRS*” (*handlingSchedule*).

Es por ello de vital importancia, tener la correspondiente información en el lugar adecuado, y al mismo tiempo, tener la información correctamente relacionada para conseguir una integración eficiente entre el modelo y la herramienta de optimización.

CAPÍTULO 6

Integración del modelo de simulación con “groundHRS”

“GroundHRS” es una aplicación de software desarrollada por la empresa Aslogic, destinada a la programación y reprogramación de los recursos de handling en tiempo real. Permite, además, que los agentes de handling consideren toda una serie de factores, como las distancias entre el equipo de handling y las posiciones de parking, las tasas de utilización de los equipos, los acuerdos de nivel de servicio SLA (Service Level Agreement) y la capacidad de la zona de rampa. Por otro lado, en caso de cambios de último momento, “groundHRS” se puede actualizar y programar en pocos minutos, teniendo en consideración la localización y la disponibilidad de los equipos de handling y del personal.

Así pues, el software proporciona numerosos beneficios a los agentes de handling, tal como se muestra en la siguiente figura:



Figura 6.1: Beneficios del software. Fuente: Aslogic.

6.1 Estructura del software

La aplicación está formada por los siguientes tres componentes interconectados entre ellos de la siguiente manera:

1. Base de datos MySQL (BDD).

2. Optimizador basado en los algoritmos evolutivos multi-objetivo.
3. Modelo de simulación.

La BDD MySQL se utiliza para guardar la información de la programación de vuelos en tiempo real, de las compañías aéreas, las aeronaves y los recursos necesarios para servir a cada vuelo. La herramienta "groundHRS" implementada en Java puede descargar la información de la BDD para encontrar una planificación factible y diaria de recursos, guardando las soluciones encontradas en la tabla "HandlingSchedule" de la BDD. De esta manera, la herramienta permite generar Diagramas de Gantt, histogramas de tiempos de inactividad de los recursos asignados, histogramas de la utilización de los caminos e histogramas de utilización de recursos.

De esta manera, el modelo de simulación desarrollado con Simio tiene el objetivo de verificar la eficiencia de las programaciones realizadas, y los experimentos a simular pueden iniciarse directamente desde la Interfaz gráfica de usuario de "groundHRS". En la Figura 6.2 se muestra el esquema general del DSS diseñado:

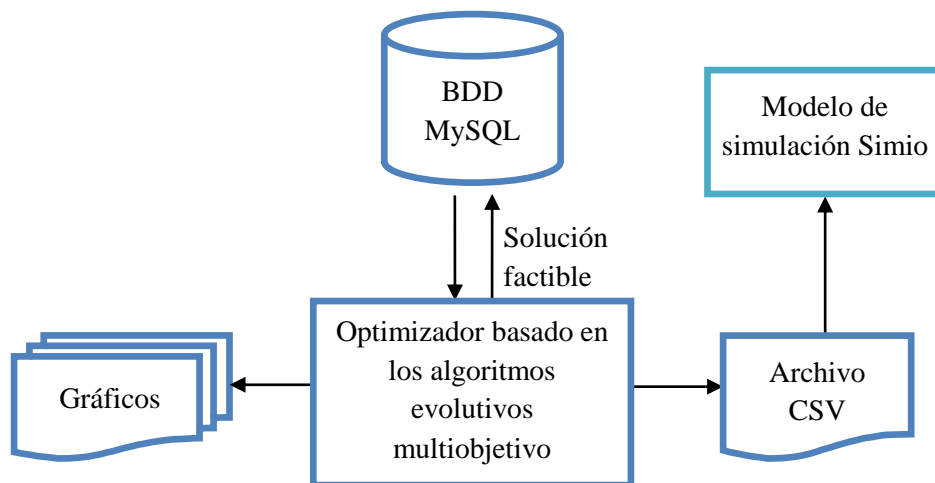


Figura 6.2: Esquema general del "groundHRS". Fuente: Aslogic.

Cada componente de "groundHRS" se describe a continuación con más detalle.

6.2 Base de datos MySQL

La BDD MySQL está formada por siete tablas con los siguientes nombres: "FlightSchedule", "Airlines", "Aircrafts", "Resources", "Handling", "Destination" y "HandlingSchedule". El diagrama Entidad-Relación (EER) de la BDD se muestra en la siguiente figura:

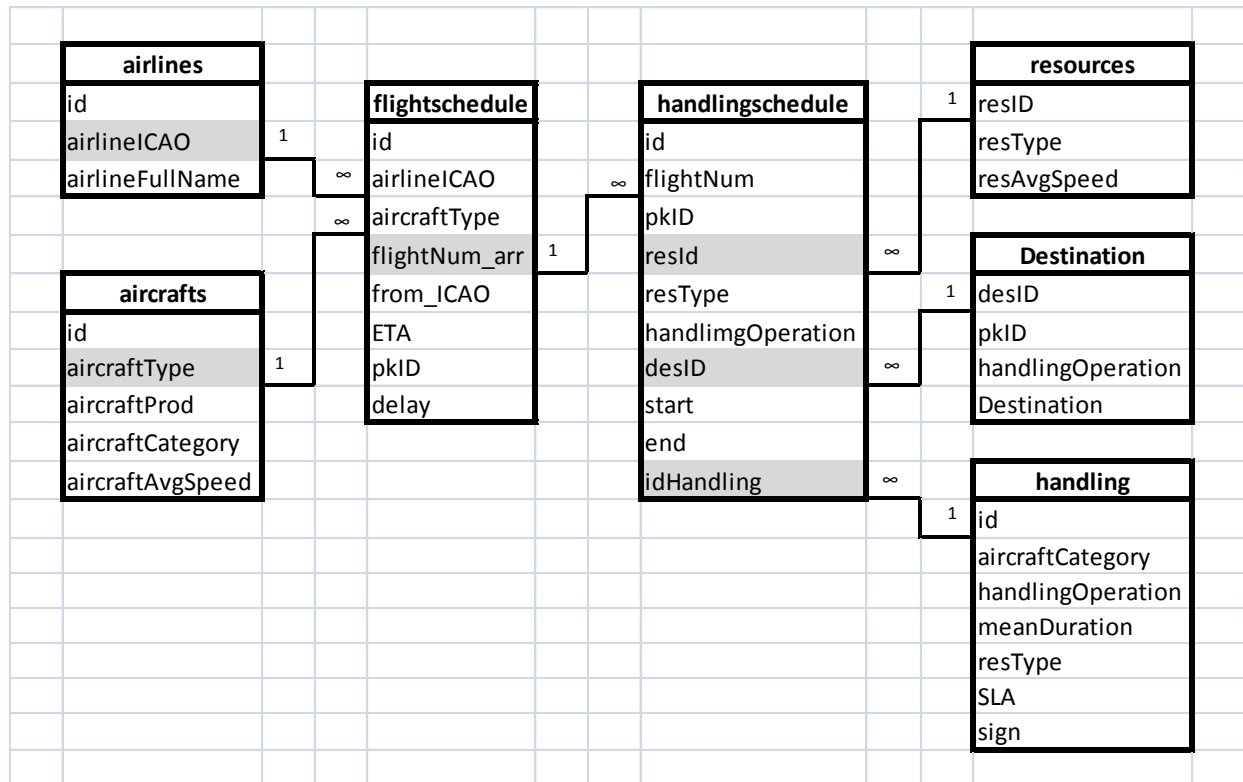


Figura 6.3: Diagrama EER de la BBD MySQL

Las tablas de la BBD incluyen los siguientes campos:

FlightSchedule:

- id – ID del vuelo
- airlineICAO – código ICAO de la compañía aérea
- aircraftType – tipo del avión
- flightNum_arr – número de vuelo de llegada
- from_ICAO – código ICAO del aeropuerto de origen
- ETA – hora de llegada de la aeronave
- pkID – ID de la posición de parking
- delay – retraso del vuelo

Airlines:

- id – ID de la compañía aérea
- airlineICAO – código ICAO de la compañía aérea
- ailineFullName – nombre completo de la compañía aérea

Aircrafts:

- id – ID del avión
- aircraftType – tipo del avión (ej. A320)
- aircraftProd – fabricante de la aeronave (ej. Airbus)
- aircraftCategory – categoría del avión (ej. Light).
- aircraftAvgSpeed – velocidad media de la aeronave (kilómetros/hora)

Resources:

- resID – ID del recurso
- resType – tipo del recurso
- resAvgSpeed – velocidad media del recurso

Handling:

- id – ID del servicio de handling
- aircraftCategory – categoría del avión
- handlingOperation – tipo de servicio handling
- meanDuration – tiempo necesario para el servicio handling
- resType – tipo del recurso
- SLA – "Service Level Agreement"
- sign – 0 o 1

Destination:

- desID – ID del destino
- pkID – ID de la posición de parking
- handlingOperation – tipo de servicio handling
- Destination – destino del recurso de handling

HandlingSchedule:

- id – ID del servicio handling
- flightNum – número de vuelo
- pkID – ID de posición de parking
- resId – ID del recurso
- resType – tipo del recurso
- handlingOperation – tipo del servicio handling
- desID – ID que relaciona con la tabla Destination
- start – fecha y hora de inicio del servicio handling del avión
- end – fecha y hora de finalización del servicio handling del avión
- idHandling – ID que relaciona con la tabla Handling

6.3 Optimizador basado en los algoritmos evolutivos multi-objetivo

La aplicación “*groundHRS*” aplica un algoritmo evolutivo multi-objetivo para resolver el problema de programación de la asistencia en tierra especificado en el capítulo 4.


Dicho algoritmo imita los principios evolutivos naturales para implementar procedimientos de búsqueda y optimización. Es por ello que está inspirado en el fenómeno de adaptación natural de los seres vivos a los cambios ambientales. La idea, básicamente, es la de codificar soluciones en forma de cromosomas, para posteriormente, hacer evolucionar una población de estos cromosomas utilizando operadores evolutivos, como cruce (crossover), mutación (mutation) y selección (selection).

A continuación se describen los pasos importantes del algoritmo:

6.3.1 Codificación de cromosomas

Cada cromosoma contiene una programación potencial de la asistencia en tierra y codifica los tiempos de inicio de los servicios de handling. Estos cromosomas consisten en sub-cromosomas, y cada uno de estos sub-cromosomas está referido a un vuelo específico.

e_1	e_2	...	e_i	e_1	e_2	...	e_i
x_{11}	x_{21}	...	x_{i1}				



Flight 1

6.3.2 Evaluación de cromosomas: clasificación “non-dominated”

El procedimiento de asignación “*ranking-based fitness*” es necesario para estimar la “profundidad de dominio”, en adelante *dominance depths*, de los cromosomas, y se describe por el siguiente algoritmo:

Algoritmo A1:

1. Encontrar un conjunto de soluciones “non-dominated” del total de la población y asignar *dominance depths* $r=1$ para cada solución candidata del conjunto.
2. Temporalmente excluir las soluciones “non-dominated” de la población.
3. Encontrar nuevas soluciones “non-dominated” de la población restante y asignarles *dominance depths* $r=r+1$.
4. Repetir los pasos 2 y 3 hasta que todos los cromosomas sean clasificados.

6.3.3 Mecanismo de preservación de diversidad – “Crowding”

Con el fin de obtener soluciones que estén uniformemente distribuidas, la implementación de este mecanismo se basa en “distancias de hacinamiento”, en adelante *crowding distances*, la cual es una estimación de la densidad de las soluciones vecinas que rodean la solución dada.

6.3.4 Cruce uniforme

El cruce uniforme se aplica a cromosomas con la probabilidad 0.8.

Algoritmo A2:

1. Genera un valor aleatorio. Si es menor que 0.8, se dirige al paso 2. Sino “exit”.
2. De manera aleatoria, selecciona dos cromosomas de la población actual.
3. Para cada gen del cromosoma descendiente, hace los pasos 4-5.
4. Genera un número aleatorio [0; 1].
5. Si el número aleatorio es menor que 0.5, se dirige al paso 6. Sino al paso 7.
6. Coge el valor del gen procedente del cromosoma padre 1.
7. Coge el valor del gen procedente del cromosoma padre 2.

6.3.5 Mutación

Se aplica con probabilidad 0.01. Consiste en “mover” un bit aleatorio del cromosoma seleccionado.

6.3.6 “Crowded-two tournament selection”

El mecanismo de “Crowded-two tournament selection” está dirigido a seleccionar cromosomas procedentes de la actual población para la “cría”, usando operadores de comparación concurridos (crowded comparison operator (\geq)). Dos de los atributos a evaluar son:

- dominance depth
- crowding distance

Así pues, de dos cromosomas el que tiene menor “dominance depth” es preferible. No obstante, en caso que ambos tengan el mismo valor, la solución con el mayor “crowding distance” será seleccionada.

6.3.7 Penalizaciones basadas en restricciones de handling

Dicha función se aplica a soluciones no factibles, con el fin de disminuir su probabilidad de supervivencia. Si alguna de las restricciones es violada, los valores de las funciones objetivos se incrementan artificialmente x tiempos.

6.3.8 Archivado externamente

Archivos externos son usados para almacenar las mejores soluciones encontradas durante el proceso.

6.3.9 Criterios de terminación

El algoritmo concluye si al cabo de diez generaciones, el conjunto de las mejores soluciones no sufre cambios.

6.4 Interfaz gráfica de usuario de “groundHRS”

La interfaz gráfica está dividida en cuatro áreas:

- 1. Input Data:** Contiene todos los datos almacenados en la base de datos local, incluyendo la programación del vuelo actual y los requerimientos SLA.
- 2. Setup Options:** Se utiliza para definir la configuración de la programación de handling.
- 3. Ground Handling Optimization and Simulation:** Está dirigido a asignar tareas a los equipos de handling de una manera óptima. Los diagramas de Gantt son simulados para realizar análisis más robustos de la programación y validar su eficiencia antes de su implementación.
- 4. Analytics:** Se utiliza para generar diagramas que describan la calidad de la programación creada por el algoritmo de optimización. Estos diagramas incluyen histogramas de precocidad, utilización de recursos y utilización de rampa.

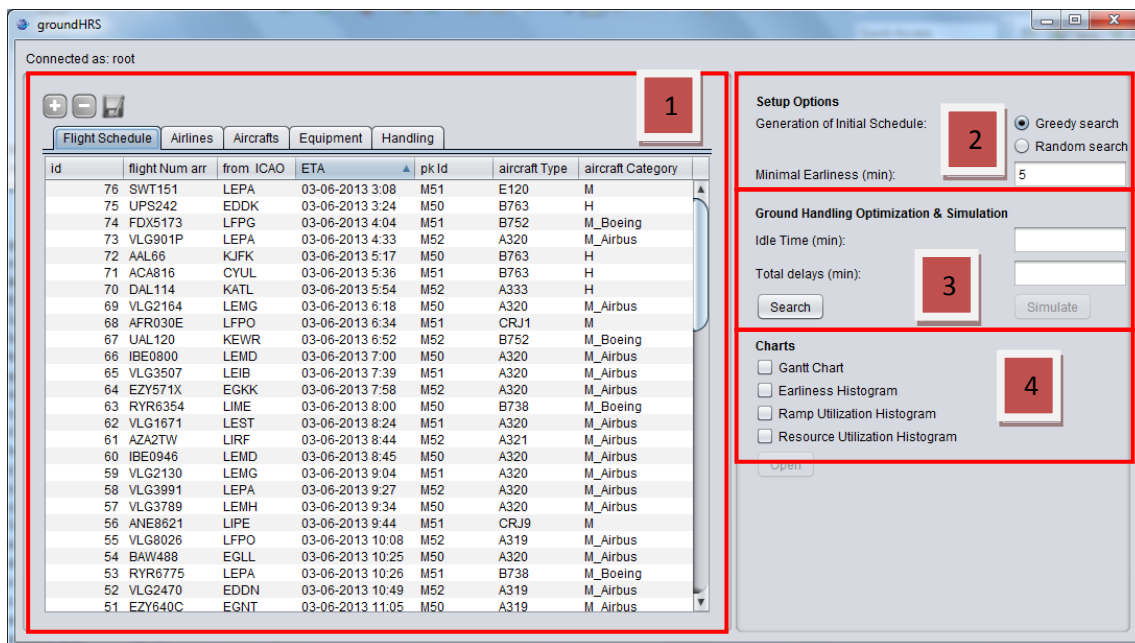


Figura 6.4: Interfaz gráfica de usuario. Fuente: Aslogic.

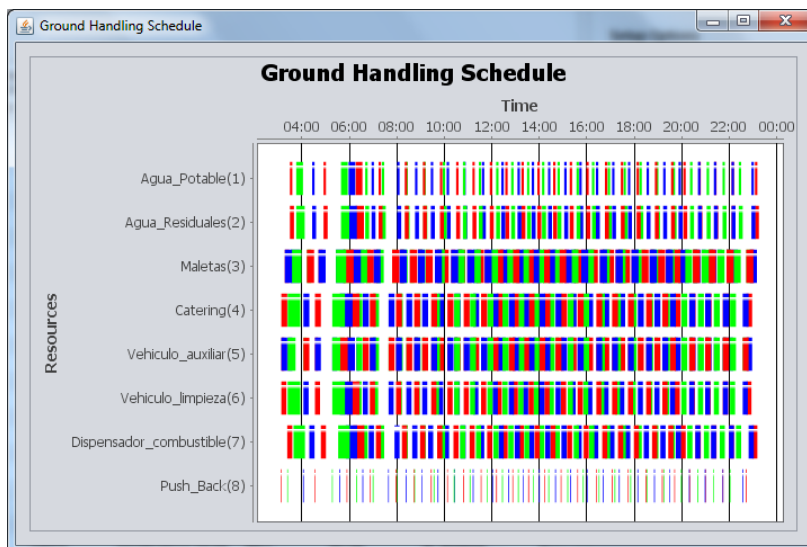


Figura 6.5: Ejemplo de la programación de los equipos de handling. Fuente: Aslogic.

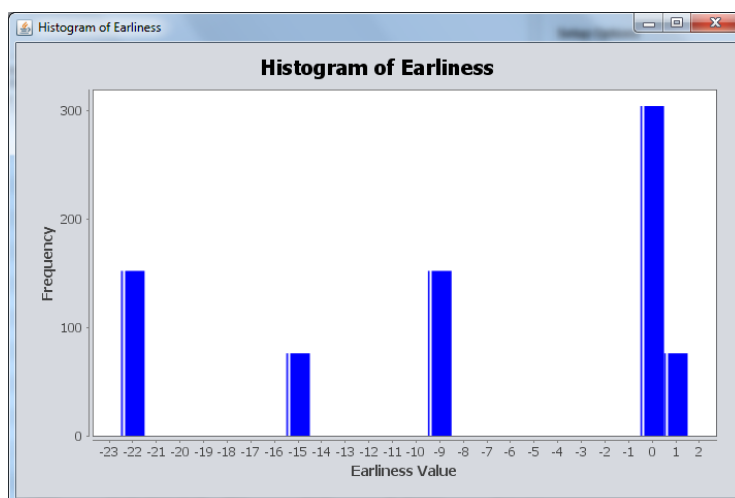


Figura 6.6: Histograma de precocidad. Fuente: Aslogic

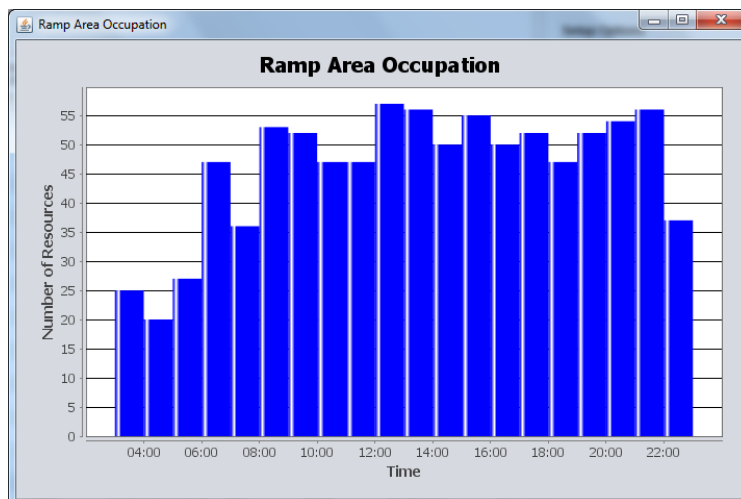


Figura 6.7: Histograma de ocupación de rampa. Fuente: Aslogic.

6.5 Conclusiones

“*GroundHRS*” es una herramienta bastante potente, que proporciona soluciones óptimas y una amplia gama de diagramas para su análisis. Por lo que a través de su uso, compañías aéreas y agentes de handling pueden obtener ventaja competitiva y un aumento en la eficiencia de las operaciones.

Finalmente, en este trabajo se ha conseguido integrar la herramienta con el modelo desarrollado, y a continuación, se proseguirá a aplicar una serie de incertidumbres para su estudio.

CAPÍTULO 7

Casos de estudio

Casos de estudio tiene la finalidad de validar la solución encontrada por el algoritmo de optimización, mediante el análisis del impacto de los resultados de una serie de casos en el modelo:

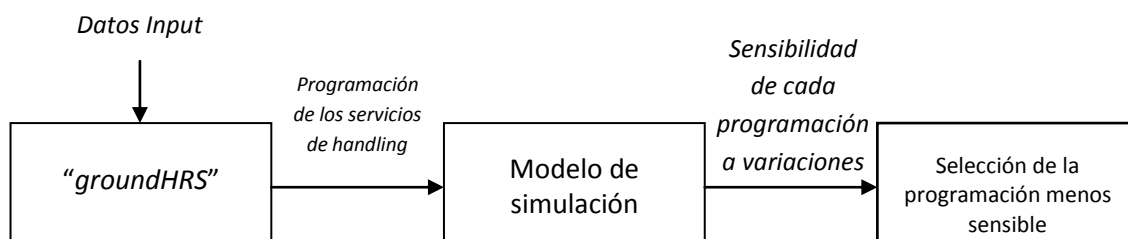


Figura 7.1: Objetivo de casos de estudio

De forma resumida, en este apartado se introduce la información input en la aplicación “groundHRS”, con la que se obtiene una programación inicial. Dicha programación se implementa en el modelo de simulación, mediante el cual se analiza la sensibilidad a variaciones. Por lo que el modelo se convierte en una poderosa herramienta para analizar lo qué pasa en cada caso de estudio y seleccionar la programación menos sensible o más robusta.

7.1 Caso de estudio 1: Análisis del impacto de los retrasos de los vuelos en el cumplimiento de los SLA

En este primer caso, se realizó un experimento con un total de 16 escenarios, en los que variaba el porcentaje de vuelos retrasados y la cantidad de retraso. El resultado obtenido se deriva del análisis de una variable, cuyo valor resulta del total de las diferencias entre las horas de inicio programadas (Handling.start) y las horas reales de inicio de las actividades, es decir, la desviación total respecto a la programación inicial.

Los resultados se pueden observar en la siguiente tabla 7.1 y su evolución en la figura 7.2:

Cantidad de retraso de los vuelos, minutos				
	5	10	15	20
Porcentaje de vuelos retrasados, %				
1	69,57 [S1]	122,46 [S2]	115,89 [S3]	115,89 [S4]
2	69,57 [S5]	122,46 [S6]	115,89 [S7]	115,89 [S8]
5	121,15 [S9]	177,05 [S10]	170,47 [S11]	170,47 [S12]
10	366,86 [S13]	528,88 [S14]	467,56 [S15]	467,56 [S16]

Tabla 7.1: Desviación total de los tiempos de handling inicialmente programados

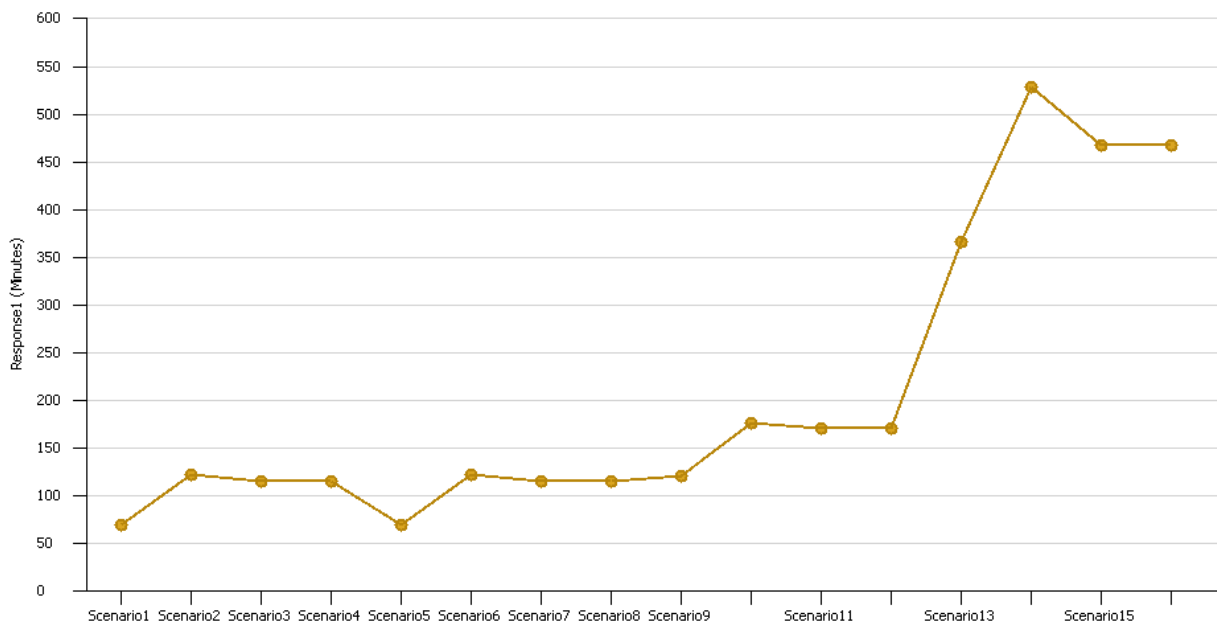


Figura 7.2: Evolución de los resultados del caso de estudio 1

Como se puede observar, el impacto en el modelo aumenta en aumentar el tiempo de retraso y la probabilidad para que ocurra. Por ello, la desviación de los tiempos de inicio con la programación inicial es cada vez mayor. No obstante, queda evidenciado también en este caso, un efecto que suele ocurrir en las operaciones de handling y que es la propagación de los retrasos en los aeropuertos.

7.2 Caso de estudio 2: Análisis del impacto de los retrasos de los vuelos en los tiempos de inactividad del equipo de handling

En el siguiente caso se evalúa el impacto de los retrasos en los equipos de handling, más concretamente, de qué manera afecta a sus tiempos de inactividad.

Para ello, se ha realizado, al igual que en el caso anterior, un experimento con 16 escenarios distintos, en los que variaba el porcentaje de retraso y la cantidad de retraso. Sin embargo, en

este caso, se analizó una variable derivada del total de las diferencias entre las horas de inicio de las actividades y las horas en las que el recurso ya estaba listo para la ejecución del servicio, es decir, la diferencia de cuando el recurso está disponible y cuando lleva a cabo su función.

Los resultados se pueden observar en la tabla 7.2 y su evolución en la figura 7.3:

Cantidad de vuelos retrasados, minutos \ Porcentaje de vuelos retrasados, %	5	10	15	20
1	65,82 [S1]	117,13 [S2]	110,76 [S3]	110,76 [S4]
2	65,82 [S5]	117,13 [S6]	110,76 [S7]	110,76 [S8]
5	116,49 [S9]	170,8 [S10]	164,44 [S11]	164,44 [S12]
10	241,97 [S13]	263,19 [S14]	248,36 [S15]	248,36 [S16]

Tabla 7.4: Tiempo de inactividad de los equipos de handling

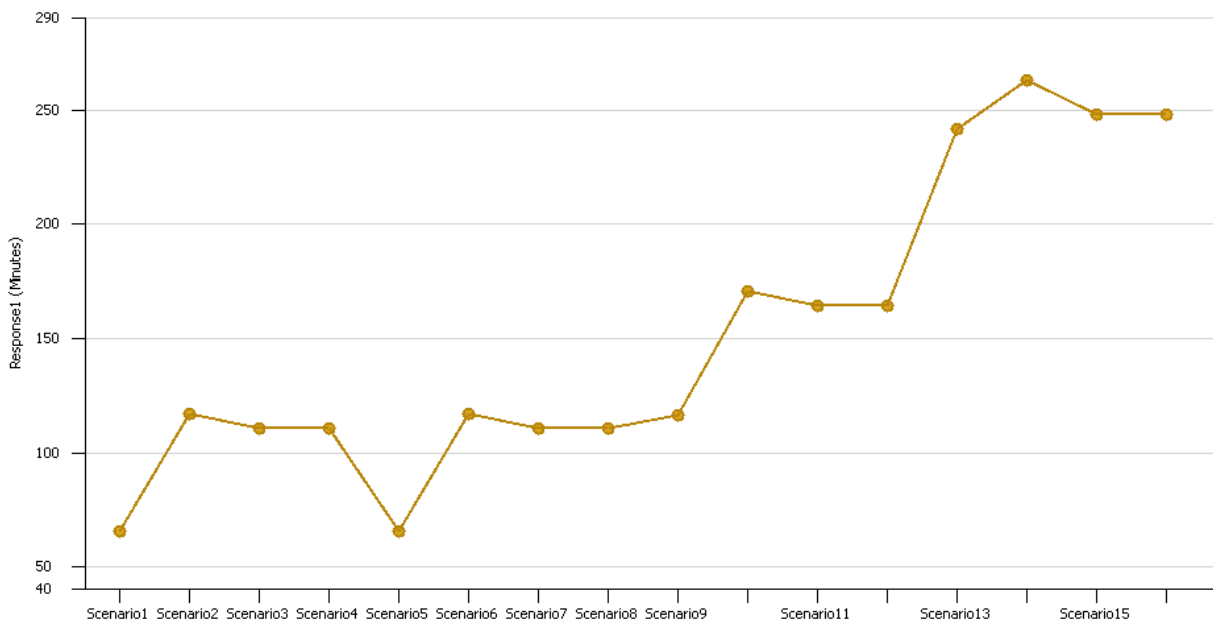


Figura 7.3: Evolución de los resultados del caso de estudio 2

De igual manera que en el caso anterior, cuanto más retraso más impacto tiene en el modelo, y los tiempos de inactividad de los equipos de handling aumentan. Aunque, claro está, esto puede variar dependiendo del número de recursos de los que se disponga, del número de vuelos que falten, de la configuración de las puertas de embarque, entre otros factores.

7.3 Caso de estudio 3: Análisis del impacto de la variación de la duración de los servicios de handling en conformidad con los SLA

Finalmente, en este último caso de estudio, se pretende analizar el impacto que tiene en los tiempos de inicio programados la variación en los tiempos de ejecución de los servicios.

De tal manera, que para los tiempos de proceso de los servicios se ha utilizado una distribución normal, en la que la duración variaba según un porcentaje. Así pues, en este caso, se ha hecho un experimento con tres escenarios distintos, dependiendo de la desviación estándar de la duración, y no se ha tenido en consideración ningún retraso en la llegada de las aeronaves.

Los resultados del experimento se pueden observar en la siguiente tabla 7.3 y su evolución en la figura 7.4:

Desviación estándar de la duración de los servicios de handling, %	Desviación total de los tiempos de handling inicialmente programados, minutos
1	14,9 [S1]
2	21,38 [S2]
5	21,36 [S3]

Tabla 7.5: Desviación total de la duración de los servicios de handling

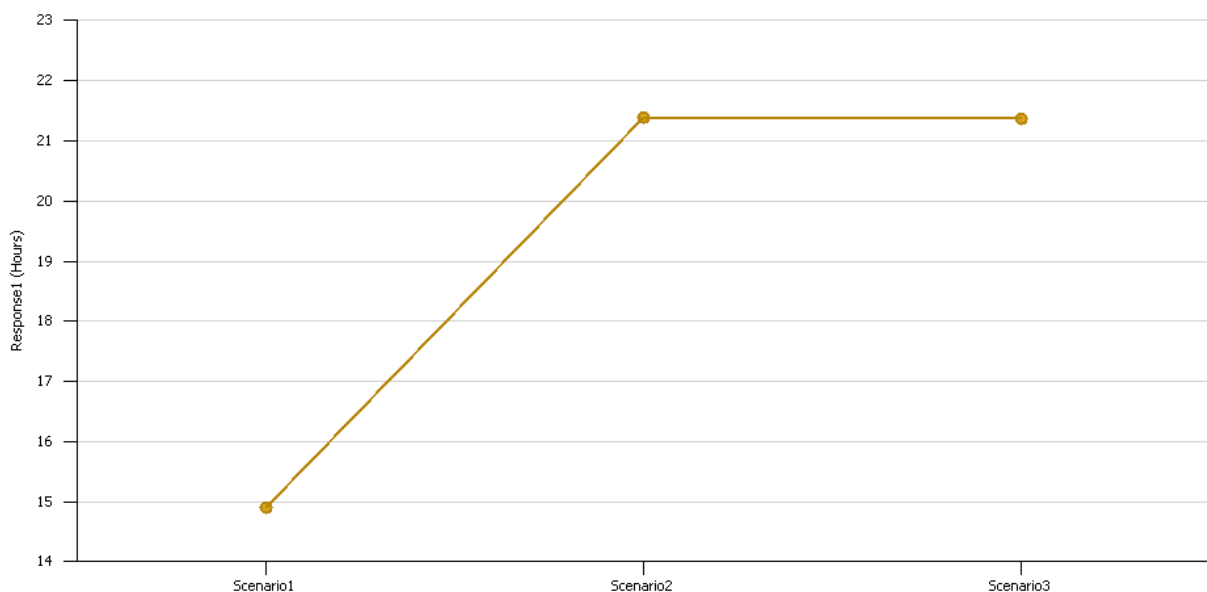


Figura 7.4: Evolución de los resultados del caso de estudio 3

De forma concluyente, queda evidenciado que las variaciones en las duraciones de las actividades también afecta a los tiempos de inicio. Esto se puede deber, en gran medida, a las

restricciones de precedencia que pueda haber entre las actividades, y también, en caso que dos aeronaves compartan los mismos recursos con poco margen de tiempo.

7.4 Conclusiones

De manera concluyente, se ha logrado aplicar en el modelo unos factores, para realizar el análisis del impacto que tienen sobre la programación dada por el algoritmo de optimización, el cual, era el objetivo del presente trabajo.

Así pues, se pueden aplicar otras soluciones en el modelo y seleccionar aquella que sea menos sensible, que será en definitiva, una solución más robusta y eficiente.

CAPÍTULO 8

Resultados y conclusiones

Finalmente, como resultado de la elaboración del presente trabajo, cabe mencionar que se ha conseguido realizar un modelo de simulación de la operativa de handling en los aeropuertos, con el que se pueden llevar a cabo toda una serie de estudios y análisis, considerando diversos factores. Entre estos factores que se pueden aplicar en el modelo, destacan los retrasos a las aeronaves, la variación en los tiempos de ejecución de los servicios, el tiempo de recorrido hasta las posiciones de parking tanto para los equipos de handling como para las propias aeronaves, entre otros.

Por otro lado, es un modelo que obtiene toda la información para su funcionamiento, mediante ficheros externos. Ello supone una ventaja considerable, ya que se le puede aplicar otra información para su análisis, sin que ello implique realizar un cambio significativo en el modelo. Además, a través del modelo, es posible obtener un gran número de resultados, que incluyen también, diagramas de todo tipo. De tal manera, que se puede apreciar mejor qué tan eficiente han sido las soluciones obtenidas, así como el impacto causado por determinados factores, y seleccionar aquella que sea más robusta y eficiente, según las circunstancias.

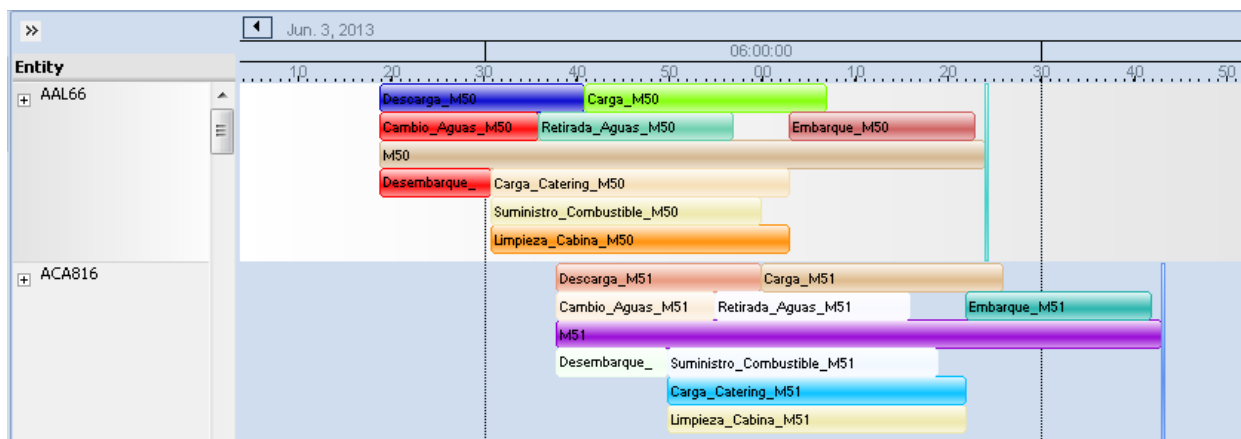


Figura 8.1: Diagrama de Gantt obtenido tras la simulación

Ahora bien, entre los aspectos que se podrían mejorar en el modelo, o más bien, que se podrían incluir, están todos aquellos aspectos relacionados con los trabajadores (horarios de trabajo, habilidades, disponibilidad), ya que únicamente se han considerado los equipos de

handling materiales. De igual manera, se podría mejorar la solución derivada del algoritmo de optimización, aportando más información referente a las características del modelo y disminuyendo así, el impacto negativo de determinadas incertidumbres (capítulo 7) y hallar una solución mejor.

Concluyendo así, la herramienta “*groundHRS*” puede ser de gran interés tanto para las aerolíneas como para los agentes de handling, pues aporta soluciones factibles y óptimas para la programación de los recursos, considerando a su vez una serie de factores y restricciones.

Sin embargo, y sobre todo en el ámbito del transporte aéreo, existen bastantes incertidumbres que afectan directamente a la programación de los recursos. Por lo que el objetivo que busca toda aerolínea, es el de minimizar el impacto que pueda causar cualquiera de estas incertidumbres, mediante programaciones eficientes. De ahí, la importancia de una herramienta como “*groundHRS*”, que permite la re-programación de los recursos en pocos minutos, considerando las nuevas circunstancias y aportando ventaja competitiva y flexibilidad.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera dar un encarecido agradecimiento a Liana Napalkova por toda la ayuda prestada a lo largo de todo el proyecto, por sus útiles correcciones, por toda la información y aportación documental, y en especial, por la paciencia que ha tenido y el interés y la enorme dedicación mostrada.

También quisiera agradecer a toda mi familia por la ayuda y la paciencia que han tenido conmigo durante todo el desarrollo del trabajo. Y finalmente, a mis compañeros por el apoyo y el interés mostrado.

REFERENCIAS

- [1] **Bazargan, Massoud** (2010). *Airline Operations and Scheduling*. 2n edición. USA: Ashgate Publishing Limited.
- [2] **Carmona, Aníbal Isidoro** (2010). *Operaciones aeroportuarias*, Madrid: AENA.
- [3] **Clausen, Tommy** (2011). "Airport Ground Staff Scheduling". PhD Thesis. DTU Management Engineering, Department of Management Engineering.
- [4] **Dohn, Anders y Kolind, Esben** (2008) "Optimizing Manpower Allocation for Ground Handling Tasks in Airports using Column Generation". Technical University of Denmark, Department of Management Engineering.
- [5] **Domingo Calvo, Mariano** (2005). *Descubrir el handling aeroportuario*, Madrid: AENA.
- [6] **Fricke, Hartmut y Schultz, Michael** (2009). "Delay Impacts onto Turnaround Performance". USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2009).
- [7] **Gomez, F. y Scholz, D.** (2009). "Improvements to ground handling operations and their benefits to direct operating costs". Hamburg university of Applied Sciences.
- [8] **Hoeg Dohn, Anders** (2010). "Manpower Planning: Task Scheduling". DTU Management Engineering, Department of Management Engineering.
- [9] **Jörg Herbers** (2005). "Models and Algorithms for Ground Staff Scheduling on Airports". PhD diss. Universitätsbibliothek.
- [10] **Kazda, Antonín y Hromádka, Martin** (2011). "How to improve airport operation". University of Zilina, Air transport department.

- [11] **Kuster, Jürgen y Jannach, Dietmar** (2006). "Handling Airport Ground Processes based on Resources-Constrained Project Scheduling". University of Klagenfurt, Austria, Department of Business Informatics and Application Systems.
- [12] **Kuster, Jürgen, Jannach, Dietmar y Friedrich, Gerhard** (2007). "Handling Alternative Activities in Resources-Constrained Project Scheduling Problems". University of Klagenfurt, Austria, Department of Business Informatics and Application Systems.
- [13] **Loth, Steffen** (2011). "Concept and prototype of a ground handling vehicle management system". Ninth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2011).
- [14] **Luethi, Marco, Kisseleff, Beat y Nash, Andrew** (2009). "De-peaking strategies for improving airport ground operations productivity at mid-sized hubs". Institute for Transport Planning and Systems.
- [15] **Mao, Xiaoyu** (2011). "Airport under Control: Multiagent Scheduling for Airport Ground Handling". Universiteit van Tilburg.
- [16] **Mao, Xiaoyu, Roos, Nico y Salden, Alfons** (2009). "Stable Multi-project Scheduling of Airport Ground Handling Services by Heterogeneous Agents". 8th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS2009).
- [17] **Mao, Xiaoyu, ter Mors, Adriaan, Roos, Nico y Witteveen, Cees** (2007). "Using Neuro-Evolution in Aircraft Deicing Scheduling". Dutch technology exchange program Casimir. Project No.CSI4006: Hybrid Human-Agent Network.
- [18] **Robusté, Francesc** (1995). "Gestión del equipaje en aeropuertos". Universidad Politécnica de Cataluña.
- [19] **Roos, Nico** (2010) "Cost optimal robust-schedules". Maastricht University, Department Knowledge Engineering.

- [20] **Sanz de Vicente, Sara** (2010). "Ground Handling Simulation with CAST". Master Thesis. Hamburg University of Applied Sciences, Department of Automotive and Aeronautical Engineering.
- [21] **Simio LLC** (2010). *Introduction to Simio*.
- [22] **CHL** (2009). "Suministro seguro también para la espalda". < http://www.clh.es/revistasclh/Numero_13/html/10.htm> [Consulta: 21 de marzo de 2013].
- [23] **Iberia** (2010). "El deshielo de los aviones". < <http://megustavolar.iberia.com/2010/12/el-deshielo-de-los-aviones/>> [Consulta: 21 de marzo de 2013].
- [24] **Rothwell, Steve** (2010). "Gategroups Weighs Takeover of Asian Catering Companies, CEO Says". < <http://www.bloomberg.com/news/2010-10-13/gategroup-targets-cathay-jal-catering-units-to-fight-galactic-lufthansa.html>> [Consulta: 23 de abril de 2013].
- [25] **Sabre, Airline Solutions** (2008). "Efficient operations". < http://www.sabreairlinesolutions.com/images/uploads/Efficient_Operations_Brochure.pdf> [Consulta: 8 de abril de 2013].
- [26] **Wikipedia** (2013). "Asistencia en tierra a aeronaves". < http://es.wikipedia.org/wiki/Asistencia_en_tierra_a_aeronaves> [Consulta: 21 de marzo de 2013].
- [27] **Wikipedia** (2013). "Elemento unitario de carga". < http://es.wikipedia.org/wiki/Elemento_unitario_de_carga> [Consulta: 23 de abril de 2013].