
5163-3. Las herramientas de modelado y simulación para la identificación y solución de problemas aeroportuarios

Caso Aeropuerto Internacional de Barcelona – El Prat

Memoria del Trabajo de fin de Grado

en

Gestión Aeronáutica

realizado por

LANDER DOMÍNGUEZ RUIZ

y dirigido por

MIGUEL ANTONIO MÚJICA MOTA

Escola d'Enginyeria UAB

Sabadell, Febrero de 2013



El firmante, **MIGUEL ANTONIO MÚJICA MOTA**,

profesor de l'Escola d'Enginyeria de la UAB,

CERTIFICA:

Que el trabajo al que corresponde la presente memoria
ha sido realizado bajo su dirección por:

LANDER DOMÍNGUEZ RUIZ

Para que quede constancia firmo la presente

En Sabadell, Febrero de 2013

Firmado digitalmente por Dr.
Miguel Mujica Mota
Nombre de reconocimiento (DN):
cn=Dr. Miguel Mujica Mota,
o=U.A.B., ou=Dept.
Telecommunications and Systems
Engineering,
email=miguelantonio.mujica@uab.
es, c=es
Fecha: 2013.02.05 14:22:00 +01'00'

Firmado: **MIGUEL ANTONIO MUJICA MOTA**

HOJA DE RESUMEN -TRABAJO DE FIN DE GRADO DE L'ESCOLA D'ENGINYERIA

Título del proyecto:

5163-3. Las herramientas de modelado y simulación para la identificación y solución de problemas aeroportuarios

Caso: Lado aire del Aeropuerto Internacional de Barcelona – El Prat

Autor: LANDER DOMÍNGUEZ RUIZ

Fecha: Febrero de 2013

Tutor: MIGUEL ANTONIO MÚJICA MOTA

Titulación: GRADO EN GESTIÓN AERONÁUTICA

Palabras clave (mínimo 3):

- **Català:** Modelatge, simulació, aeroport, CAST Aircraft, aeroport de Barcelona-El Prat
- **Castellano:** Modelado, simulación, aeropuerto, CAST Aircraft, aeropuerto Barcelona-El Prat
- **English:** Modelling, simulation, airport, CAST Aircraft, Barcelona – El Prat Airport

Resumen del proyecto (extensión máxima 100 palabras):

- **Català:**

Dia rere dia, i any rere any les eines de simulació digital han anat evolucionat amb l'objectiu d'adaptar-se a les necessitats i problemes de la societat. Una d'aquestes necessitats, es presenta en l'àmbit de l'aeronàutica.

El propòsit d'aquest projecte és utilitzar els últims avenços en simulació digital orientada a l'aeronàutica, per desenvolupar un model de simulació del costat aire de l'aeroport de Barcelona - El Prat, amb l'objectiu de poder, posteriorment, realitzar experiments de simulació dirigits a obtenir informació sobre el comportament del sistema aeroportuari.

- **Castellano:**

Día tras días, y año tras año las herramientas de simulación digital han ido evolucionado con el objetivo de adaptarse a las necesidades y problemas de la sociedad. Una de estas necesidades, se presenta en el ámbito de la aeronáutica.

El propósito de este proyecto es utilizar los últimos avances en simulación digital orientada a la aeronáutica, para desarrollar un modelo de simulación del lado aire del *Aeropuerto Internacional de Barcelona - El Prat*, con el objetivo de poder, posteriormente, realizar experimentos de simulación dirigidos a obtener información acerca del comportamiento del sistema aeroportuario.

- **English:**

Day after day and year after year digital simulation tools have evolved in order to adapt to the needs and problems of society. One of these needs is presented in the field of aeronautics.

The purpose of this project is to use the latest advances in aeronautics oriented digital simulation, to develop a simulation model of the airside of Barcelona International Airport - El Prat, with the aim of performing simulation experiments that can provide information about the behaviour of the airport system.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO | 3 |
| 2. LA SIMULACIÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS | 5 |
| 2.1 ¿Qué es la simulación? | 5 |
| 2.1.1 Introducción al concepto de simulación | 5 |
| 2.1.2 Historia de la simulación | 6 |
| 2.1.3 Presente y futuro de la simulación digital | 9 |
| 2.2 Propósito general de simulación | 10 |
| 2.2.1 La necesidad de simulación | 10 |
| 2.2.2 Usos generales de la simulación | 11 |
| 2.3 Ventajas y desventajas de la simulación | 13 |
| 2.4 Ciclo de vida de un proyecto de modelado y simulación | 16 |
| 2.5 Tipos de sistemas de simulación | 19 |
| 2.6 Tipos de modelos de simulación | 21 |
| 2.7 Tipos de simulación | 24 |
| 2.7.1 Sistemas orientados a eventos discretos (DES) | 24 |
| 2.7.2 Simulación basada en agentes | 29 |
| 2.7.3 Simulación de dinámica de sistemas (Sistemas dinámicos) | 31 |
| 3. SIMULACIÓN ORIENTADA A LA AERÓNAUTICA. MODELADO Y SIMULACIÓN DEL AEROPUERTO INTERNACIONAL DE BARCELONA-EL PRAT | 33 |
| 3.1 Introducción a la simulación aeroportuaria | 33 |
| 3.2 Propósito específico de la simulación. Herramientas de simulación aeronáutica y aeroportuaria | 33 |

| | |
|---|-----------|
| 3.3 Formulación del problema y conceptualización del modelo | 36 |
| 3.3.1 Formulación del problema | 36 |
| 3.3.2 Objetivos del proyecto | 37 |
| 3.3.3 Datos y características generales del aeropuerto de Barcelona- El Prat | 37 |
| 3.3.4 Aspectos generales sobre la operativa de la zona aire del aeropuerto | 40 |
| 3.3.5 La operativa del aeropuerto de Barcelona – El Prat | 42 |
| 3.3.6 Conceptualización y requerimientos del modelo | 43 |
| 3.4 Elección del software de simulación | 44 |
| 3.5 Descripción del proyecto | 46 |
| 3.5.1 Etapa de modelado | 46 |
| 3.5.1.1 Obtención y gestión de la información del proyecto | 46 |
| 3.5.1.2 Proceso de modelado del sistema | 48 |
| 3.5.2 Etapa de verificación y validación del modelo | 56 |
| 3.5.3 Etapa de simulación. Solución de problemas operacionales del aeropuerto | 58 |
| 4. DEBATE, CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO | 79 |
| BIBLIOGRAFÍA | 81 |

1. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO

Desde los inicios de la simulación, que datan del año 1777, con el planteamiento del problema de la “Aguja de Buffon”¹, hasta la simulación digital que conocemos en la actualidad, no solamente han transcurrido años, sino que han pasado delante de nosotros gran parte de los avances en informática y tecnología.

Como se pasa a comentar posteriormente, los avances en el campo de la simulación siempre han ido en paralelo a la evolución de la informática y la tecnología, por lo que, en múltiples ocasiones su avance se ha encontrado limitado por la falta de las herramientas tecnológicas adecuadas.

Día tras días, y año tras año las herramientas de simulación digital han ido evolucionado con el objetivo de adaptarse a las necesidades y problemas de la sociedad. Una de estas necesidades, se presenta en el ámbito de la aeronáutica. Si bien es cierto que en el año 1903, con el primer vuelo de los hermanos Wright, la aviación no suponía un elemento problemático dentro de la sociedad, a día de hoy nos encontramos ante un sector que cuenta con mas de 38.571² aeronaves en el mundo, y que a su vez fueron capaces de transportar, en el año 2011, alrededor de 2200 millones de pasajeros en todo el mundo.

Por lo tanto, surge la necesidad de ser capaz de gestionar esta industria, que crece a un ritmo del 5% anual (*según OACI*) de la manera mas eficaz y con la mayor eficiencia posible. Además, este aumento del trafico aéreo global, ha generado nuevas necesidades como son los aeropuertos o el control del trafico aéreo.

¹ **Problema de la Aguja de Buffon:** La aguja de Buffon es un clásico problema de probabilidad geométrica, de realización práctica y cuyo interés radica en que es un método difícil para ir aproximando el valor del número π a partir de sucesivos intentos. (**Fuente:** Wikipedia: *Aguja de Buffon*)

² Numero total de aeronaves en activos a finales de 2011 incluyendo aeronaves comerciales, aeronaves militares y aeronaves de uso privado. (**Fuente:** EU-Statistics)

Dada la dificultad de abarcar todos los aspectos que forman del sistema aeronáutico, este proyecto se centrará en el análisis de la infraestructura aeroportuaria, concretamente en el sistema de la operativa de la zona aire.

Por lo tanto, el propósito de este proyecto es utilizar los avances en simulación digital orientada a la aeronáutica, para desarrollar un modelo de simulación del lado aire del *Aeropuerto Internacional de Barcelona - El Prat*. Este modelo debe permitir posteriormente, realizar experimentos de simulación dirigidos a obtener información acerca del comportamiento del sistema aeroportuario y de esta manera detectar problemas operativos que puedan suponer una reducción en la eficiencia operativa del aeropuerto como sistema.

Mediante la realización de este proyecto, se podrá observar y conocer el comportamiento de un sistema real complejo, como son los aeropuertos, a la vez que nos permitirá establecer y proponer soluciones que sean capaces de mejorar la eficiencia operativa del Aeropuerto de Barcelona- El Prat.

En relación a la elaboración del proyecto, en primer lugar, cabe destacar y agradecer la cooperación de la compañía *Airport Research Center GmbH (ARC)* de Aachen (Alemania), que ha facilitado las herramientas de modelado y simulación, así como la formación necesaria para el uso de estas.

El proyecto, se ha dividido en dos bloques principales. En el primer bloque, se estudiará desde un punto de vista teórico, la simulación como herramienta para la solución de problemas de ámbito general. En este primer bloque, se expondrán diversas temáticas, que van desde los últimos avances en materia de simulación, sus utilidades, ventajas e inconvenientes, diferentes tipos de simulación etc.

El segundo bloque se centrará en el estudio del proceso de modelado y simulación del lado aire del aeropuerto de Barcelona – El Prat. En primer lugar, se realizará una aproximación teórica al estado del arte de las herramientas simulación aeroportuarias disponibles hoy en día, para posteriormente proseguir con la descripción de las etapas de modelado y simulación del aeropuerto. Finalmente, dentro de la etapa de simulación, se evaluarán diferentes escenarios problemáticos detectados en el aeropuerto, con el objetivo, de obtener respuestas que permitan dar solución a estos problemas.

Conocer los puntos fuertes y los débiles de la operativa de la zona aire del aeropuerto de Barcelona, permitirá actuar con eficacia, evitando problemas en un futuro en el que los aeropuertos se encuentran cada vez más congestionados.

2. LA SIMULACIÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

2.1. ¿QUÉ ES LA SIMULACIÓN?

2.1.1. Introducción al concepto de simulación.

Los últimos avances en tecnología, conducen invariablemente a la construcción de sistemas de mayor complejidad y nivel de abstracción. Es en estos casos es donde la simulación provee de los medios necesarios con los que entender la complejidad y la abstracción de estos modelos, a través de la creación de un modelo que imite el comportamiento de estos sistemas.

Obtener una definición de simulación, puede suponer una tarea confusa dada gran cantidad de perspectivas existentes respecto al termino. Con el objetivo de evitar cualquier posible confusión, es importante definir de una manera clara y inequívoca el termino y sus diferentes usos.

Si se analiza la definición que expone “*The Oxford English dictionary*” se define la simulación como:

“La técnica de imitar el comportamiento de una situación o sistema (Económico, mecánico etc.) mediante un modelo análogo, situación o aparato, ya sea para obtener información con mayor comodidad o con el objetivo de capacitar al personal”

Dado que este proyecto se centra en la simulación por ordenador y por lo tanto el “modelo análogo” descrito en la definición puede ser ejecutado en un ordenador. Paul Fishwick, un especialista en técnicas de simulación, describe en su libro “*Simulation model design and execution*” la simulación por ordenador como:

“La disciplina de diseñar un modelo de un problema físico actual o teórico, ejecutando el modelo en un computador digital y analizando los resultados de la ejecución”

Por otra parte, desde una perspectiva educacional, *Diana Laurillard* define la simulación por ordenador como:

“ La simulación basada en computadores es un programa que representa algún aspecto del mundo, y permite al usuario realizar inputs en el modelo, así como mostrar los resultados”

Si se pasan a analizar las dos definiciones descritas por los citados autores se puede comprobar que existe un acuerdo por parte de los expertos en simulación y los usuarios del sector educativo que se podría resumir en los siguientes puntos:

1. Existe un modelo computacional de un sistema teórico o real que contiene la información de cómo se comporta el sistema.
2. Existe la posibilidad de experimentar con el modelo. Por ejemplo, cambios en los inputs del modelo afectan a los outputs o resultados de este.

En definitiva, tal y como argumentan los autores en la publicación *“Modelado y simulación – Aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios”* se podría definir la simulación digital como:

“La técnica que permite imitar (o simular) en un ordenador el comportamiento de un sistema real o hipotético según ciertas condiciones particulares de operación”

El análisis, estudio y mejora del comportamiento de un sistema mediante estas técnicas requiere, en primer lugar, de la descripción formal del conocimiento de los procesos del sistema (construcción del modelo conceptual) y posteriormente su codificación en un entorno de simulación que permita realizar experimentos y analizar los resultados.

Si se analiza esta definición se puede observar como el uso de las técnicas de simulación digitales posee un campo de aplicabilidad muy amplio. Este hecho que ha producido que estas técnicas hayan adquirido una gran relevancia durante los últimos años, dando solución a diferentes problemas en campos como la ingeniería, la ciencias, la economía, la sociología etc.

2.1.2. Historia de la simulación

La historia y la evolución de la simulación por ordenador han ido paralelas a la evolución de la Informática. Se podría considerar que la simulación nace en 1777 con el planteamiento del problema de *“La aguja de Buffon”*, un método matemático sencillo para ir aproximando el valor del número π a partir de sucesivos intentos. El planteamiento matemático de este problema se basa en: teniendo una aguja de longitud determinada que es lanzada sobre un plano segmentado por líneas paralelas separadas en unidades. *¿Cuál es la probabilidad de que la aguja cruce alguna línea?*

En 1812 Laplace mejoró y corrigió la solución de Buffon y desde entonces se conoce como solución *Buffon-Laplace*. Posteriormente, el estadístico William Sealy Gosset,

que trabajaba en la destilería de *Arthur Guinness*, ya aplicaba sus conocimientos estadísticos en la destilería y en su propia explotación agrícola. El especial interés de Gosset en el cultivo de la cebada le llevó a especular que el diseño de experimentos debería dirigirse no sólo a mejorar la producción media, sino también a desarrollar variedades de cebada cuya mayor robustez permitiese que la producción no se viese afectada por las variaciones en el suelo y el clima.

Para evitar futuras filtraciones de información confidencial, *Guinness* prohibió a sus empleados la publicación de cualquier tipo de artículo independientemente de su contenido, de ahí el uso que hizo Gosset en sus publicaciones del seudónimo "*Student*", para evitar que su empleador lo detectara. Es por esta razón que su logro más famoso se conoce como la "*distribución t de Student*", que de otra manera hubiera sido conocida como la "*distribución t de Gosset*".

Este hito histórico abrió las puertas a la aplicación de la simulación en el campo del proceso de control industrial así como a las sinergias que generaba esta simulación basada en la experimentación y técnicas de análisis para descubrir soluciones exactas a problemas clásicos de la industria y la ingeniería.

Durante la segunda Guerra Mundial dos hechos sentaron las bases para la rápida evolución del campo de la simulación. En primer lugar, la construcción de los primeros computadores de propósito general como el ENIAC (*Electronic Numerical Integrator And Computer*). En segundo lugar, el trabajo de Stanislaw Ulam, John Von Neumann y otros científicos para el uso de métodos en computadores modernos y solucionar problemas de difusión de neutrones en el diseño y desarrollo de la bomba de hidrógeno. En este caso, los experimentos basados en prueba y error eran muy caros y el problema era demasiado complicado para abordarlo mediante técnicas analíticas. Optaron por una aproximación analítica se basada en la utilización de números aleatorios y distribuciones de probabilidad. El método desarrollado fue llamado "*Método de Montecarlo*".

Más adelante, en 1960, Keith Douglas Tocher desarrolló un programa de simulación general cuya principal tarea era la de simular el funcionamiento de una planta de producción donde las máquinas tenían un ciclo basado en estados: Ocupado, Esperando, No disponible y Fallo; de manera que las simulaciones en los cambios de estado de las máquinas marcarán el estado definitivo de la producción de la planta. Este trabajo produjo además el primer libro sobre simulación: *The Art of Simulation* (1963).

Para aquel entonces, IBM desarrolló entre 1960 y 1961 el Sistema de Simulación de propósito general o *General Purpose Simulation System* (GPSS). El GPSS se diseñó para realizar simulaciones de teleprocesos involucrando por ejemplo: control de tráfico urbano, gestión de llamadas telefónicas, reservas de billetes de avión, etc. La sencillez de uso de este sistema lo popularizó como el lenguaje de simulación más usado de la época.

Por otro lado, en 1963 la compañía RAND desarrolló SIMSCRIPT, otra tecnología alternativa al GPSS basada en FORTRAN, más enfocada a usuarios que no tenían porqué ser obligatoriamente expertos informáticos.

Complementariamente a los desarrollos llevados a cabo por RAND e IBM, el *Royal Norwegian Computing Center* inició en 1961 el desarrollo del programa SIMULA con ayuda de Univac. El resultado fue SIMULA I, probablemente el lenguaje de programación más importante de toda la historia.

En 1967 se fundó la WSC (*Winter Simulation Conference*), lugar donde desde entonces y hasta ahora se archivan los lenguajes de simulación y aplicaciones derivadas, siendo en la actualidad el referente en lo que a avances en el campo de los sistemas de simulación se refiere.

En los años posteriores (1970 - 1981), el campo de la simulación sobrellevo un periodo de expansión durante el cual se desarrollaron avanzadas herramientas de modelado y de análisis de resultados. Gracias también a los desarrollos obtenidos en la generación de datos y a las técnicas de optimización y representación de datos, la simulación llega a su fase de expansión donde comienza a aplicarse en múltiples campos.

En esos momentos la simulación era todavía un aspecto utilizado en las escuelas de Ingeniería pero raramente aplicado. El éxito y la popularidad de la simulación como una herramienta potente incremento a raíz de las diversas conferencias que se realizaron durante los siguiente años. Aún y este hecho durante los primeros años de los 80 se continuaba viendo a la simulación como una herramienta extremadamente complicada que solo podía ser utilizada por expertos.

No obstante, el numero de sistemas computarizados aumentó de los cuatro existentes en 1970 a mas de doscientos a principios de 1980. Durante ese periodo, la mayor parte de los software de simulación existentes se concentraban en el la planificación de necesidades de materiales (MRP).

A finales de los ochenta se vieron nuevos desarrollos como SIMANIV y CINEMAIV, que incorporaban software de uso fácil con menús y pestañas así como mejoras en la animación. De esta manera se lleo en 1984 al desarrollo del primer lenguaje de específicamente orientado a la simulación de procesos de producción.

Como se comentaba anteriormente, la evolución de los sistemas de simulación ha estado siempre vinculada a los avances en computadores y la evolución de la informática. Es por esto que a principios de los noventa, y debido al aumento de la memoria adicional de los ordenadores (640k) nuevas versiones del software GPSS/PC creado por IBM empezaron a surgir.

El poder de la simulación como herramienta de optimización se convirtió en evidente durante la mitad de los noventa. Diferentes compañías apostaron por la simulación como herramienta para el análisis de procesos. En este punto los modelos eran

utilizados principalmente para el diseño de nuevas plantas productivas o para el análisis del flujo de producción de diferentes industrias. El objetivo a partir de ese momento era crear software con costes bajos que permitiesen modelar con facilidad y rapidez cualquier proceso imaginable. A raíz de este objetivo, nace en 1998 software como Micro Saint que aportaba una interfaz de uso sencilla, herramientas de modelado y optimización y recogida automática de datos.

Hoy en día, la simulación ha avanzado hasta tal punto que permite al usuario modelar, ejecutar y animar cualquier proceso productivo con el nivel de detalle deseado. Hasta el punto que, un complejo de 2000 metros puede ser modelado en cuestión de minutos.

2.1.3. Presente y futuro de la simulación digital

En las últimas décadas la simulación ha sido destacada como la más importante herramienta de investigación de operaciones. A continuación se presentan algunos ejemplos:

- *Rasmussen y George (1978)* preguntaron a los graduados del Departamento de Investigación de operaciones de la Case Western Reserve University sobre el valor de los métodos después de la graduación. Los primeros cuatro métodos fueron análisis estadísticos, series temporales, análisis de sistemas y sistemas de información. La simulación fue el siguiente, por delante de otros métodos tradicionales en investigación de operaciones como programación lineal y teoría de colas.
- *Thomas y DaCosta (1979)* dieron a los analistas de 137 grandes firmas una lista de herramientas y les preguntaron cuales de ellas usaban. El análisis estadístico resultó clasificado en primer lugar, el 93% de las firmas dijeron utilizarlo, seguido por la simulación con el 84%. De nuevo la simulación se situó delante de herramientas como la programación lineal, PERT/CPM, teoría de inventarios, y programación no lineal.
- *Shannon, Long, y Buckles (1980)* miembros de la división de investigación de operaciones del Instituto Americano de Ingenieros Industriales, encontraron que entre todas las herramientas la simulación era la primera en utilidad e interés. Era la segunda en familiaridad, detrás de la programación lineal.
- *Forgionne (1983); Harpell, Lane, y Mansour (1989) y Lane, Mansour y Harpell (1993)* constataron que en las grandes corporaciones el análisis estadístico era el más utilizado, mientras que la simulación era el segundo.

La principal razón para la popularidad de la simulación es la habilidad para tratar con modelos muy complicados correspondientes a sistemas muy complicados. Otra razón para la creciente popularidad de la simulación es la mejora de los ratios de

rendimiento-precio de los ordenadores, haciendo accesible lo que era excesivamente costoso unos años atrás. Por último los avances en la potencia del software de simulación, flexibilidad y facilidad de uso han llevado a los programadores de los lenguajes de bajo nivel a los nuevos paquetes de simulación.

De esta manera la popularidad y efectividad de la simulación es mayor que la de los años precedentes debido a los avances en hardware y software.

La tasa de cambio en la simulación se ha acelerado en los últimos años. Los últimos sistemas operativos han permitido una mayor integración del software con otros paquetes estándar como hojas de cálculo, procesadores de texto, bases de datos, etc. En el futuro se verán más aplicaciones verticales dirigidas a mercados más concretos. Esto permitirá a los analistas construir modelos más fácilmente, utilizando elementos prediseñados para su sector en concreto. Las primeras aplicaciones de estos tipos ya están en el mercado con aplicación en áreas como comunicaciones, semiconductores, centros de atención al cliente etc.

Hoy en día se utiliza la simulación para diseñar o rediseñar sistemas complejos, pero el siguiente paso será controlar el sistema real con la misma simulación. Este avance obligará a mantener el modelo actualizado y no se utilizará una sola vez, sino que se convertirá en una parte crítica de la operación del sistema.

Con los rápidos avances que se están haciendo en hardware y software, es difícil predecir mucho sobre el futuro, pero se pueden imaginar avances como el análisis automático de datos, software con capacidad de decisión, simulaciones totalmente integradas en paquetes de control de producción e incluso con realidad virtual.

2.2. PROPÓSITO GENERAL DE LA SIMULACIÓN

2.2.1. La necesidad de simulación

La simulación se compone de un conjunto de sistemas de hardware y software que se utilizan para imitar el comportamiento de una entidad o fenómeno. Por lo general, la entidad o fenómeno que se simula es del dominio de lo material - que van desde la simulación de una placa de circuitos integrados, a la simulación del comportamiento de una avioneta en situaciones de mala meteorología. Un simulador, puede ser utilizado para analizar y verificar modelos teóricos que son demasiado difíciles de entender desde un nivel puramente conceptual. Es por esto que la simulación desempeña un papel crucial tanto en la industria como en la investigación.

A pesar del creciente reconocimiento de la simulación como herramienta de investigación viable y necesaria, se debe ser consciente de los problemas potenciales que puede representar la simulación. Muchos de estos problemas se encuentran relacionados con las limitaciones computacionales de hardware existentes. No obstante, este hecho está siendo rápidamente superado por la introducción de plataformas de mayor potencia. En el apartado (2.3) se destacan en profundidad las principales ventajas e inconvenientes relacionados con los simuladores a día de hoy.

2.2.2. Usos generales de la simulación

Hoy en día la simulación ofrece un amplio rango de usos en áreas como el análisis, diseño, investigación, educación, formación y entretenimiento. Antes de la llegada de los ordenadores con recursos gráficos, los resultados obtenidos a través de la simulación eran únicamente interpretables por el propio modelador y la disciplina requería de un experto programador con amplios conocimientos matemáticos.

Una vez el hardware mejorado permitió una mejor visualización de los datos y resultados, nuevos grupos de expertos (gerentes de empresas, personal educativo etc.) fueron capaces de explorar de una manera fácil los datos y soluciones obtenidos a través de las simulaciones haciendo que la fase experimental del proceso de simulación fuese mas accesible.

Con los últimos avances en hardware y la disponibilidad de ordenadores, la simulación ha empezado a ser utilizada cada vez mas en educación, formación y investigación donde la atención se centra en el uso de los modelos para manejar sistemas o para explorar procesos.

Actualmente, se pueden dividir los usos generales de la simulación en las siguientes categorías:

1. Investigación

La investigación mediante el uso de simuladores, es importante para explorar la precisión y utilidad de nuevas técnicas analíticas que implican la derivación y verificación de los modelos de los sistema. En este caso, las simulaciones se utilizan como herramientas de investigación que permiten establecer tendencias, demostrar la relación entre los diferentes parámetros del sistema o realizar predicciones sobre aspectos futuros inciertos.

2. Diseño

Los diseñadores utilizan la simulación como herramienta para caracterizar o visualizar un sistema que todavía no existe y del que se pretende extraer una solución optima. Por ejemplo, utilizando la simulación para modelar una instalación de fabricación y de esta manera tener la capacidad y los medios para experimentar con diferentes diseños, distribuciones, capacidades, maquinaria, cadena de suministro etc. Con el objetivo de mejorar la eficiencia del sistema o proceso.

3. Análisis

El análisis hace referencia a los procesos en los cuales la simulación es utilizada para determinar el comportamiento o capacidad o la exactitud de un sistema en uso. Puede ser también utilizado para examinar el comportamiento de sistema

reales bajo condiciones extremas o imposibles.

En estos casos, el comportamiento del modelo es establecido mediante la recolección de los datos que genera el sistema. Por ejemplo: La optimización de la gestión de un hospital, la simulación de los horarios del personal, equipamientos y pacientes etc.

4. Formación

Las simulación formativa se utiliza para recrear situaciones reales en las que la experimentación humana es difícil o peligrosa. De esta manera la simulación permite entrenar individuos evitando cualquier tipo de daño o perjuicio causado por esta experimentación y reducciones los costes. Un amplio rango de simulaciones pueden ser llevadas a cabo, desde situaciones de alta complejidad como por ejemplo la simulación de vuelo o el diseño de centrales nucleares hasta las simulaciones informáticas más básicas.

5. Educación

En el ámbito educativo, es tan importante saber como realizar algo, como saber el porque o las consecuencias. La simulación permite representar los modelos necesarios para llevar a cabo la experimentación de hipótesis y la comprensión de un sistema. Esto es debido a que la simulación proporciona herramientas que explican el comportamiento de sistemas dinámicos complejos. Potencialmente, cualquier simulador puede ser utilizada en niveles educativos simples.

6. Entretenimiento

La simulación aplicaba al ámbito del entretenimiento por ordenador (*juegos "arcade" o juegos de rol*) requiere de un modelo consistente sobre una realidad ficticia. Muchos de ellos utilizan las técnicas de entrenamiento, diseño y análisis (por ejemplo las de optimización y control) explicadas anteriormente.

De manera específica y concreta, tomando como referencia los artículos publicados durante la *Winter Simulation Conference 2011*³, realizada en Phoenix (Arizona) se puede tener una visión específica de los diferentes campos de aplicación de la simulación digital durante el último año:

- **Modelado de procesos de negocios (*Bussines proceding*):**

Soporte a la toma de decisiones en el sector automovilístico, gestión de flujos de trabajo, soporte de tareas administrativas etc.

³ The **Winter Simulation Conference (WSC)** el principal foro internacional para la difusión de los últimos avances en el campo de la simulación del sistema. Además de un programa técnico de alcance sin igual y calidad, WSC es el lugar de encuentro para los profesionales de la simulación, los investigadores, y los vendedores que trabajan en todas las disciplinas de la industria, servicios, gobierno, militares y sectores académicos. (**Fuente:** *Winter Simulation Conference*. (WSC))

- **Aplicaciones medioambientales y de sostenibilidad:** Uso de la simulación para la reducción de los gases de efecto invernadero, simulación de la rapidez de expansión de incendios forestales, reducción de costes mediante el uso de sensores de luz etc.
- **Aplicaciones para el sector sanitario:** detección de enfermedades a través de la identificación de síntomas, optimización de la gestión de recursos médicos (ambulancias, personal, materiales etc.)
- **Procesos de fabricación:** fabricación sostenible, soporte para la toma de decisiones, planificación y optimización.
- **Aplicaciones militares:** simulación de combate, logística y movilidad.
- **Emergencias:** gestión de emergencias y operaciones humanitarias.
- **Aplicaciones para el transporte:** por ferrocarril (simulación de redes de vías y efectos), por carretera (gestión de la logística del transporte), transporte intermodal.
- **Logística y *supply chain management*:** Gestión de RFID, control de inventarios, eficiencia en la distribución de materiales, minimización de la incertidumbre.
- **Análisis del riesgo:** simulación de eventos poco comunes.
- **Calidad, estadística y fiabilidad:** Diseño de experimentos de optimización.
- **Gestión de proyectos:** gestión de proyectos de construcción, animación 3D de proyectos.
- **Educación:** La simulación como herramienta para el soporte a la formación.

2.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA SIMULACIÓN

Durante los últimos años, la disponibilidad en el mercado de entornos de simulación orientados a campos específicos, junto con la mejora de la capacidad grafica y de visualización de los ordenadores, han hecho posible que la simulación sea una técnica cada vez más utilizada en el análisis y la mejora de sistemas.

Con el objetivo de ejemplificar esta tendencia de crecimiento de la simulación, tal y como se presenta en apartados anteriores, ya en el año 1979 los autores Thomas y DaCosta, dieron a conocer en su estudio "*A simple survey of corporate operations research*" el análisis realizado a 137 grandes empresas en el que se les exponía una lista de herramientas con el objetivo de cuestionar cuales de ellas eran las mas utilizadas. Los resultados de este análisis situaron a los análisis estadísticos en primer lugar (un 93% de las compañías aseguraron utilizar estas técnicas), seguido muy de cerca por las técnica de simulación no digitales (con un 84%). Este hecho confirmo que la simulación era la segunda técnica mas utilizada por detrás de la estadística y situándose por delante de otras técnicas como la investigación operativa o los métodos PERT/CPM.

Este hecho, es debido, en parte a las diversas ventajas que presentan las técnicas de simulación. A continuación se pasan a detallar algunos de los objetivos y ventajas para

los cuales pueden utilizarse de manera muy satisfactoria las diferentes técnicas de simulación digital:

- Una de las principales ventajas de las técnicas de simulación, es el hecho de que son capaces de proporcionar a los usuarios información práctica en el diseño de los sistemas del mundo real. Esto permite al diseñador determinar la exactitud y la eficiencia de un diseño o modelo antes que el sistema sea construido.

Por consiguiente, el usuario es capaz de explorar los diferentes diseños alternativos sin ni siquiera tener que construir el modelo físico del sistema. Mediante la investigación de los efectos de un diseño específico durante las primeras fases del proyecto en lugar de esperar a la fase de construcción, permite reducir significativamente los costes globales de construcción del sistema. Además, la observación de los resultados que se obtienen de un simulador a través de experimentar con ciertos parámetros del modelo, así como cambios en las entradas, pueden inferir en aspectos relativos a la sensibilidad del sistema y al rendimiento de este.

Por ejemplo, si se considera el proceso de diseño y fabricación de un equipo electrónico. Durante la fase de diseño, el diseñador se encuentra con un conjunto de cuestiones que debe resolver como la distribución de los componentes y las conexiones de cableado. En este caso sería extremadamente costoso fabricar todos los diseños potenciales planteados con el objetivo de evaluar su respectivo rendimiento.

Sin embargo, mediante el uso de técnicas de simulación el usuario puede investigar el rendimiento de cada uno de los diseños sin tener que fabricar el modelo en sí. En este caso, al imitar el comportamiento de los diseños, la simulación permite aportar información y datos con el objetivo de poder fabricar el producto más eficiente o el que más se adapte a las necesidades.

- Relacionado con el aspecto anterior, la simulación permite experimentar con condiciones de operación que podrían resultar peligrosas, de elevado coste económico o incluso imposibles en el sistema real.
- Otro beneficio de la simulación se centra en el hecho que permiten a los diseñadores de sistemas estudiar problemas desde diferentes niveles de abstracción. Aproximando el sistema con un mayor nivel de abstracción, el diseñador es capaz de entender el comportamiento y las interacciones de todos los componentes de alto nivel dentro del sistema y por lo tanto se encuentra preparado para explicar y mejorar el conocimiento sobre la complejidad del sistema global.

Sin el uso de la simulación esta complejidad puede abrumar al diseñador si el problema es abordado desde una perspectiva de bajo nivel.

En este caso a medida que el diseñador entiende mejor el funcionamiento de los componentes de alto nivel (mediante el uso de la simulación), los componentes de bajo nivel pueden ser entonces diseñados y posteriormente simulados para la verificación y la evaluación del rendimiento. La simulación ofrece la posibilidad en este caso de construir el sistema mediante técnicas *“top-down”*. Los modelos *“top-down”* formulan un resumen del sistema, sin especificar detalles. Posteriormente cada parte del sistema se refina diseñándola con mayor detalle hasta que la especificación es completa.

- Aspectos relacionados con la organización de una empresa también pueden ser evaluados mediante la simulación. Cambios en una organización, así como la gestión de la información pueden ser fácilmente simulados y los efectos sobre el sistema real pueden ser analizados a partir de la experimentación con el modelo.
- La simulación puede ser también utilizada de manera efectiva como herramienta formativa y de entrenamiento. Este hecho es particularmente cierto en los simuladores que hacen un uso inteligente de las herramientas gráficas y la animación. Dichos simuladores, permiten mostrar dinámicamente el comportamiento y la relación de los diversos componentes del sistema simulado, proporcionando así al usuario una comprensión significativa de la naturaleza del problema.

Considerando una vez más el ejemplo del equipo electrónico simulado. Al mostrar los resultados el usuario puede ver realmente lo que está sucediendo dentro del equipo (circuito, señales, componentes etc.) y por consiguiente obtener una mejor comprensión de la dinámica. Este simulador permite también a los usuarios acelerar, ralentizar, detener o incluso revertir la simulación.

A modo de resumen de los aspectos positivos que las diversas técnicas de simulación ofrecen actualmente al mercado se podrían dividir en los siguientes puntos:

- Son técnicas que pueden ser utilizadas como una metodología de trabajo segura y barata.
- Permite responder a incógnitas y preguntas del tipo *“What if?”* que pasaría en caso de realizar una acción, cambio o aplicación.
- Ayuda notablemente a reducir el riesgo existente en la toma de decisiones comerciales, empresariales, productivas etc.
- Permite realizar modelos y simulación de diferentes ámbitos con la complejidad deseada y en cualquier nivel de detalle, teniendo como únicas restricciones la imaginación, las habilidades de programación y el rendimiento del ordenador.

A pesar de las ventajas que presenta la simulación, cabe destacar, que como la mayoría de herramientas presenta ciertos inconvenientes o riesgos.

La mayor parte de estos problemas pueden ser atribuidos al lento procesamiento computacional de datos requeridos por algunos simuladores. Como consecuencia, los resultados de la simulación pueden no estar disponibles una vez la simulación se ha iniciado. Un evento que puede ocurrir instantáneamente en el mundo real puede tardar horas en ser imitado en un entorno simulado. Estos retrasos se deben al elevado número de entidades simuladas o a las complejas interacciones que se producen entre estas entidades. Por consiguiente los simuladores se encuentran restringidos por el *hardware* disponible. Sin embargo, la aparición durante los últimos de plataformas mas potentes y mejores técnicas de simulación están haciendo de este problema una preocupación menor.

Por otro lado, el hecho de que en ocasiones la simulación sea utilizada como herramienta para la toma de decisiones, conlleva un riesgo elevado si el modelo en el cual basamos este estudio no ha sido validado y las fases del proyecto convenientemente verificadas.

Durante los últimos años las técnicas de simulación han ido popularizándose en paralelo al aumento de potencia de las herramientas. Este hecho juntamente con la facilidad de uso y las mejoras en los entornos de visualización han propiciado la introducción de usuarios con un nivel menor de especialización. Por lo tanto si bien se ha popularizado la utilización de estas técnicas también se ha incrementado el mal uso. Tal y como se argumenta en la publicación *“Modelado y simulación – Aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios”*, un modelo de simulación no puede ser mejor que los datos y las técnicas empleadas en su construcción.

2.4. CICLO DE VIDA DE UN PROYECTO DE MODELADO Y SIMULACIÓN

Como ya se ha comentado anteriormente, los modelos de simulación se emplean a menudo en grandes problemas complejos debido a su capacidad para capturar las complejas interacciones y procesos, que, en la mayoría de casos son imposibles de analizar a través de otras técnicas.

Existe un consenso entre las personas involucradas en el desarrollo y mantenimiento de modelos de simulación, de que los modelos simples son preferibles a los modelos complejos. A pesar de ello, muchos proyectos de simulación, suelen ser largos y complejos, teniendo una duración que puede ser de un mes, un trimestre o incluso varios años.

Teniendo en cuenta que un proyecto de simulación es dinámico por naturaleza y que por lo tanto los resultados que se van obteniendo a lo largo del proyecto pueden llevar a replantear o reorientar algunos aspectos del mismo. Por lo tanto, atendiendo a la dificultad de obtener éxito en un entorno dinámico, es de vital importancia emplear una aproximación metodológica al proyecto correcta.

A continuación (ver Tabla 2.4.1) se presentan el conjunto de etapas correspondientes a un proyecto de simulación. Si bien las etapas siguen un proceso secuencial, en el que

una etapa no comienza hasta que la anterior no ha finalizado, es posible que ciertas etapas, como la de validación obliguen a retroceder a etapas anteriores con el objetivo de modificar aspectos conceptuales del modelo:

| Etapas | Descripción |
|---------------------------------|--|
| 1. Formulación del problema | Define el problema que se pretende estudiar. Incluye por escrito sus objetivos. |
| 2. Diseño del modelo conceptual | Especificación del modelo a partir de las características de los elementos del sistema que se quiere estudiar y sus interacciones teniendo en cuenta los objetivos del problema. |
| 3. Recogida de datos | Identificar, recoger y analizar los datos necesarios para el estudio |
| 4. Construcción del modelo | Construcción del modelo de simulación partiendo del modelo conceptual y de los datos. |
| 5. Verificación y validación | Comprobar que el modelo se comporta como es de esperar y que existe la correspondencia adecuada entre el sistema real y el modelo. |
| 6. Análisis y experimentación | Analizar los resultados de la simulación con la finalidad de detectar problemas y recomendar mejoras o soluciones. |
| 7. Documentación | Proporcionar documentación sobre el trabajo efectuado. |
| 8. Implementación | Poner en práctica las decisiones efectuadas con el apoyo del estudio de simulación. |

Tabla 2.4.1 Etapas de un proyecto de simulación. (Fuente: Antoni Guasch. Miquel Àngel Piera. Josep Casanovas. Jaume Figueras.(2002) “Modelado y simulación. Aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios”. Edicions UPC.)

1. Formulación del problema

La especificación de los objetivos del problema constituye una de las tareas mas importantes a desarrollar durante el ciclo de vida del proyecto. Es importante que los objetivos queden correctamente definidos y claros dado que una mala identificación de esto puede poner en peligro la viabilidad de todo el proyecto.

Por lo tanto, todo proyecto de simulación empieza por la identificación de unos objetivos que deben ser precisos, razonables, comprensibles y medibles.

2. Diseño del modelo conceptual

Una vez definidos correctamente los objetivos del proyecto y previamente a iniciar la construcción del modelo de simulación es importante formular el modelo de simulación empleando un nivel de abstracción elevado, con el objetivo de conseguir un modelo conceptual del sistema. Este modelo conceptual debe especificar las relaciones estructurales mas importantes que se den en el sistema. En esta etapa también, se deben identificar y especificar los resultados que se esperan obtener del modelo, dando respuesta a los objetivos planteados en la etapa anterior.

3. Recogida de datos

Esta etapa tiene como objetivo recoger y tratar de manera correcta los datos necesarios para la construcción del modelo. En esta etapa tan importante es conseguir todos los datos necesarios como validez de estos. Los autores definen en la publicación *“Modelado y simulación – Aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios”* una serie de cuestiones a tener en cuenta con el objetivo de validar la calidad y la cantidad de los datos obtenidos. *¿Cuál es la fuente? ¿cuándo se obtuvo? ¿cómo fue recogida? ¿tiene esta sentido? ¿tenemos insuficientes datos o excesivos?*

Dado que en ocasiones es difícil obtener datos correctos, estos son de vital importancia para obtener una solución correcta. Es por tanto, que se debe ser prudente durante esta etapa respecto a aquellos datos cuya calidad o fuente sea dudosa, dado que pueden distorsionar los resultados de la simulación.

4. Construcción del modelo

En esta etapa, la obtención de un modelo ejecutable no debería ser un objetivo prioritario. La motivación de esta etapa debería ser, obtener una comprensión completa del problema a la vez que la obtención de soluciones.

Con este objetivo, se puede optar por construir en primer lugar un modelo detallado de alto nivel, que ayude a comprender el problema.

5. Verificación y validación

Se entiende por verificación, el conjunto de pruebas y métodos que permiten garantizar que la implementación del modelo conceptual es correcta y el modelo de simulación es consistente respecto al conceptual, respondiendo a la pregunta: *¿Se ha construido correctamente el modelo?*

Por su parte se entiende por validación, el proceso consistente en determinar en que manera las teorías y las hipótesis de trabajo, así como las suposiciones bajo las que se ha formalizado el modelo conceptual y la simulación son correctas. Además es necesario contrastar los resultados con expertos en el

proceso con el objetivo de comprobar si el modelo se comporta como ellos espera. La validación responde a pregunta como : ¿Se ha construido el modelo correcto? ¿ Un experto, diferenciaría los resultados de la simulación con los de un sistema real?

Mediante la etapa de verificación y validación podemos tener una garantía mas o menos razonable de que el modelo de simulación representa la realidad con un mínimo grado de fiabilidad y como consecuencia las decisiones y operaciones tomadas a cabo en base a la simulación son reales.

6. Análisis

En esta etapa se pretende experimentar con el modelo mediante el uso de técnicas analíticas (reducción de la variancia, diseño de experimentos) con el objetivo de efectuar inferencias que permitan tomar decisiones con mayor seguridad.

7. Documentación

Debido a la naturaleza dinámica de este tipo de proyectos, es necesario mantener un documento que refleje el estado del proyecto en cada momento. Este documento evolucionara de manera paralela al proyecto.

8. Implementación

Se puede entender la etapa de implementación, como aquella en que se toman decisiones extraídas como consecuencia del estudio de simulación. Un proyecto no tiene éxito si ha justificado técnica y económicamente una mejora o cambio que finalmente no es implementada.

2.5. TIPOS DE SISTEMAS DE SIMULACIÓN

Antes de introducir el concepto de modelo de un sistema y definir los principales modelos de simulación existentes, se debe definir el concepto de sistema.

Se puede definir un sistema como un conjunto de componentes que son interdependientes o interactúan entre sí formando una unidad integrada o bien como un conjunto de elementos (componentes) y sus relaciones. Es decir, son entidades que interactúan entre si para alcanzar un objetivo.

Por ejemplo, si se considera un proyecto que analiza la longitud de la cola de los mostradores de *check-in* de un aeropuerto dependiendo de la cantidad de mostradores operativos, los componentes principales de este sistema serían los pasajeros que esperan su turno para realizar la facturación y el personal de tierra que realiza el proceso. Se podrían considerar otros componentes secundarios como serían

las maletas facturadas. En estos casos, el número de componentes considerados puede variar dependiendo del objetivo del análisis.

El estado del sistema está caracterizado por el valor que tengan las variables de estado en un instante de tiempo dado. El conjunto de variables de estado debe ser suficiente para el propósito de estudio, y puede diferir en el número y tipo de variables si los objetivos de la simulación cambian. En el ejemplo anterior, podríamos definir como variables de estado, el estado de cada uno de los mostradores de *check-in* (ocupado, en uso, disponible) o el número de clientes que están haciendo cola en cada mostrador.

Por lo tanto, si se considera que la finalidad de los análisis o experimentos es el estudio de los diferentes comportamientos y procesos de un sistema, se pueden clasificar los sistemas en las siguientes categorías (teniendo en cuenta la evolución de las variables de estado en relación al tiempo):

- **Sistemas continuos:**

Las variables de estado evolucionan de forma continuada con el tiempo. Por ejemplo, el nivel de agua en un tanque evoluciona continuamente a lo largo del tiempo tomando cualquier valor de un rango continuo.

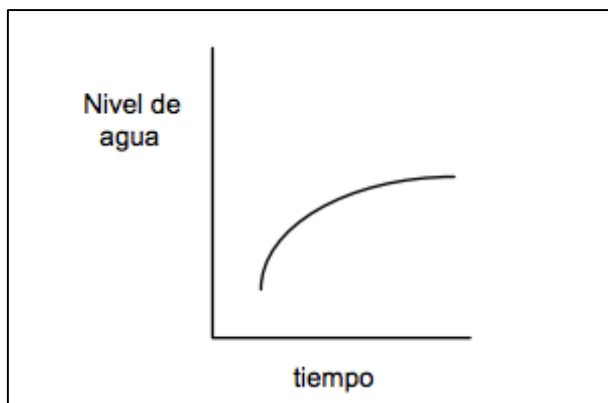


Fig. 2.5.1. Gráfico que presenta un ejemplo de sistema continuo.

- **Sistemas discretos:**

Es un sistema en que las variables de estado cambian en ciertos instantes de tiempo y permanecen constantes durante un periodo de tiempo. Los cambios en el sistema obedecen un patrón. Por ejemplo, el número de pedidos realizados en un restaurante de comida rápida y que deben ser completados.

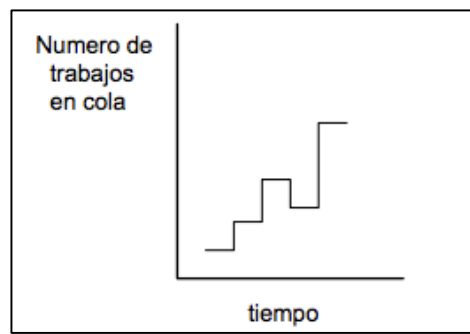


Fig.2.5.2. Gráfico que presenta un ejemplo de un sistema discreto.

Antes de proceder con la descripción de los sistemas orientados a eventos discretos es necesario introducir el concepto de evento en simulación. Un evento puede definirse como:

“Una acción que ocurre de forma instantánea y que causa la transición de un estado discreto a otro”

- **Sistemas orientados a eventos discretos:**

En un sistema orientado a eventos discretos, las variables toman valores de un conjunto discreto de valores en instantes concretos de tiempo que no obedecen ningún patrón estático. Por ejemplo continuando con el proceso de *check-in* el siguiente gráfico representa el estado de los mostradores (ocupado =1 y libre =0) a lo largo del tiempo.

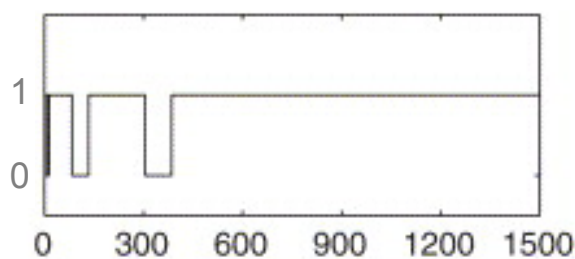


Fig.2.5.3. Gráfico que presenta un ejemplo de un sistema orientado a eventos discretos

2.6. TIPOS DE MODELOS DE SIMULACIÓN

Un modelo es cualquier representación, lo mas simplificada posible, de las dinámicas de interés de un sistema, que permita, comprender, explicar, cambiar, prever y posiblemente controlar el comportamiento de un sistema.

Existen diferentes metodologías para el desarrollo de modelos matemáticos de sistemas físicos. Con el fin de garantizar una representación eficiente del sistema real se deben tener en cuenta un conjunto de consideraciones:

- Un modelo es siempre una aproximación del sistema real basado en hipótesis y aproximaciones. En consecuencia, nunca se podrá considerar una representación perfecta del sistema real.
- Un modelo siempre es construido para un objetivo específico. Por lo tanto debe ser formulado de manera que sea útil para responder a este.
- Un modelo es siempre el resultado de un compromiso entre simplicidad y la necesidad de incorporar todos los aspectos relevantes del sistema.

Un modelo por lo tanto, debe asegurar que cumple con las propiedades que se exponen a continuación:

- Debe ser capaz de representar las características del sistema que se pretendan analizar.
- Debe ser una representación abstracta de alto nivel, con el objetivo de facilitar su comprensión, mantenimiento, adaptación y reutilización.

Teniendo en cuenta las consideraciones y propiedades descritas anteriormente se pueden clasificar los modelos en las siguientes aproximaciones:

Modelos estáticos vs. Modelos dinámicos

Se entiende por modelo de simulación estático, la representación de un sistema en un instante particular en el tiempo o bien la representación de un sistema, en el que el avance en el tiempo no es una variable considerada. Por ejemplo, la simulación de Montecarlo.⁴

En cambio un modelo de simulación dinámico representa un sistema en el que el tiempo es una variable de interés, dado que permiten deducir como estas variables evolucionaran respecto al tiempo. Un ejemplo podría ser un modelo que simule el avance de un incendio forestal en relación al transcurso del tiempo.

Modelos deterministas vs. Modelos estocásticos

Un modelo determinista es aquel en el que un nuevo estado puede ser definido de manera completa a partir de los estados previos y sus entradas. Estos modelos no se comportan siguiendo ninguna ley probabilística, por lo que cada simulación, retorna los mismos resultados y no es necesario repetir esta simulación repetidamente.

Sin embargo, muchos sistemas se modelan tomando en cuenta algún componente probabilístico-aleatorio de entrada (modelos estocásticos). En consecuencia, durante la fase de experimentación, el modelo generara diferentes conjuntos de salidas, por lo que será necesario realizar repetidas simulaciones para estimar los valores de las

⁴ **Simulación de Montecarlo:** El método de Montecarlo es un método no determinístico o estadístico numérico, usado para aproximar expresiones matemáticas complejas y costosas de evaluar con exactitud.

variables del sistema. Si tomamos como ejemplo de modelo estocástico, un sistema de inventarios de una fabrica, veremos como la salida que presenta el sistema dependerá de variables de carácter aleatorio (demanda, estacionalidad etc.). Por consiguiente la información obtenida únicamente podrá ser utilizada a modo de estimación del modelo real.

Modelos continuos vs. Modelos discretos

Los modelos de simulación discretos y continuos, se definen de manera análoga a los sistemas discretos y continuos explicados anteriormente.

Los modelos continuos se caracterizan, por representar la evolución de las variables de interés de forma continua. Por el contrario los modelos discretos, se caracterizan por representar la evolución de las variables de interés de forma discreta.

No obstante, se debe tener presente que un modelo discreto de simulación no siempre se usa para modelar un sistema discreto. La decisión de utilizar un modelo discreto o continuo para simular un sistema en particular, depende de los objetivos específicos de estudio y no de las características del sistema.

Poniendo como ejemplo, un modelo de flujo de tráfico en una carretera, puede ser discreto si las características y el movimiento de los vehículos en forma individual es importante. En cambio si los vehículos pueden considerarse como un agregado en el flujo de tráfico, entonces se puede usar un modelo basado en ecuaciones diferenciales presentes en un modelo continuo.

A modo de conclusión del concepto de modelo, tal y como describen los autores en la publicación *“Modelado y simulación. Aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios”* a continuación se presentan algunas definiciones generales validas y algunas características que debe cumplir un buen modelo:

- Un modelo es un objeto o concepto que utilizamos para representar cualquier otra entidad compleja (un sistema). Así pues, mediante un proceso de abstracción, se muestran en un formato adecuado las características de interés de un objeto (sistema) real o hipotético.
 - Un modelo es una representación simplificada de un sistema que nos facilitará explicar, comprender, cambiar, preservar, prever y posiblemente, controlar el comportamiento del mismo.
 - Un modelo puede ser el sustituto de un sistema físico concreto.
 - Un modelo debe representar el conocimiento que se tiene de un sistema de modo que facilite su interpretación, formalización tan sólo los factores relevantes para los objetivos del modelado.
 - Un modelo debe ser tan sencillo como sea posible (ya que el desarrollo de los modelos universales es impracticable y poco económico) siempre y cuando represente adecuadamente los aspectos de interés.
-

2.7. ENFOQUES DE SIMULACIÓN

2.7.1. Simulación orientada a eventos discretos (DES)

Los modelos de eventos discretos son modelos dinámicos, estocásticos y discretos en los que las variables de estado cambian de valor en instantes no periódicos del tiempo.

En la *simulación orientada a eventos discretos (DES)* la operación de un sistema es representada como una secuencia de eventos cronológica. Cada uno de estos eventos, ocurre durante un instante en el tiempo y marca un cambio en el estado del sistema. Pongamos un ejemplo: Si el objetivo es simular el comportamiento de un ascensor, un evento sería el momento en que se presiona el botón de llamada del ascensor. Como resultado se obtiene un cambio en el estado del sistema que pasa de estar “*parado*” a estar “*en movimiento*” y que por lo tanto (salvo error en el ascensor) este se situara en la posición desde la cual ha sido reclamado.

Componentes y lógica de funcionamiento de un sistema orientado a eventos discretos.

Además de la representación de las variables de estado del sistema y la lógica de aquello que sucede cuando se producen los eventos del sistema, la simulación orientada a eventos discretos incluye los siguientes componentes:

- **Reloj de simulación:**

La simulación debe mantener un registro del tiempo de simulación actual en unidades de medición adecuadas para el sistema que se está modelando.

En las simulaciones orientadas a eventos discretos, en contraposición a las simulaciones en tiempo continuo, se producen “saltos” en el tiempo, dado que los eventos simulados son instantáneos. De esta manera el reloj avanza hasta la hora de inicio del próximo evento activo a medida que avanza la simulación.

- **Lista de eventos:**

Se puede definir un *evento* como la ocurrencia instantánea de algo que puede cambiar el estado del sistema. En este caso la simulación mantiene al menos una lista de eventos de simulación, comúnmente conocida como “Lista de eventos pendientes” por el hecho de que se enumeran los eventos que se encuentran pendientes de activar como resultado del evento simulado anteriormente. Un evento, es descrito por el momento en que se produce y un código del evento.

Dado que en la simulación orientada a eventos discretos, los eventos son instantáneos, las actividades que se extienden a lo largo del tiempo se modelan como secuencias de eventos.

La “*lista de eventos pendientes*” se organiza como una cola de prioridad según los tiempos de cada evento. Es decir, independientemente del orden en que los eventos se añadan al conjunto de eventos, estos serán retirados en orden estrictamente cronológico (según tiempo del evento).

- **Generador de números aleatorios:**

La simulación necesita generar variables aleatorias de diversos tipos dependiendo del modelo del sistema. Este hecho se logra mediante el uso de uno o mas generadores de números aleatorios.

- **Distribuciones estadísticas:**

La simulación por lo general hace uso de distribuciones estadísticas que cuantifiquen los aspectos de interés del sistema. Por ejemplo, en una cola es de interés utilizar distribuciones estadísticas para realizar un seguimiento de los tiempos medios de espera.

- **Condiciones de fin:**

Debido a que los eventos se inician, en teoría, una simulación de eventos discretos podría continuar ejecutándose de manera indefinida. Es por esto que se debe decidir en que momento debe finalizar una simulación. Las opciones típicas son del estilo : “*en el tiempo t* ” o “*después de procesar un número n de eventos*” o de manera mas general, “*cuando X medida estadística alcance el valor de X* ”

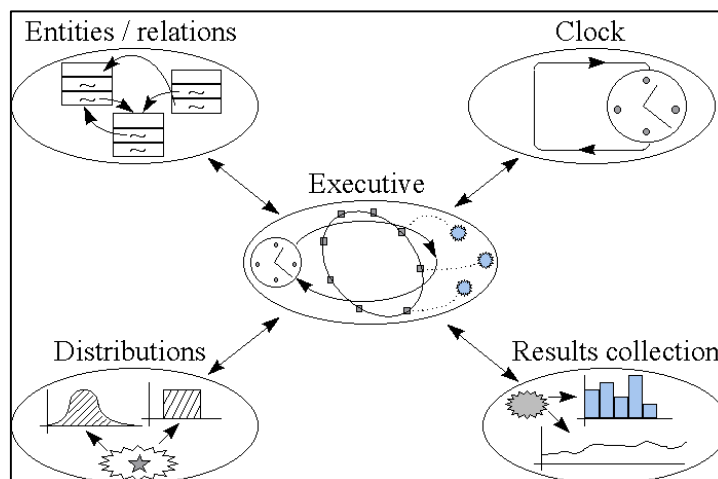


Fig. 2.7.1.1 Estructura de un sistema de simulación orientada a eventos discretos
(Fuente: Kreutzer, 1986)

Mecanismos que definen la lógica de la simulación

Existen diferentes formas de representar la lógica dentro de un modelo de simulación de eventos discretos. Estos diferentes enfoques, pueden ser utilizados para el modelado del sistema y producen los mismos resultados. En este caso, las diferencias radican en la facilidad con la que pueden ser entendidos, aplicados y la eficiencia de su cálculo.

A continuación se describen los tres mecanismos ilustrados en la figura 2.7.1.2 :

- Eventos
- Actividades
- Procesos

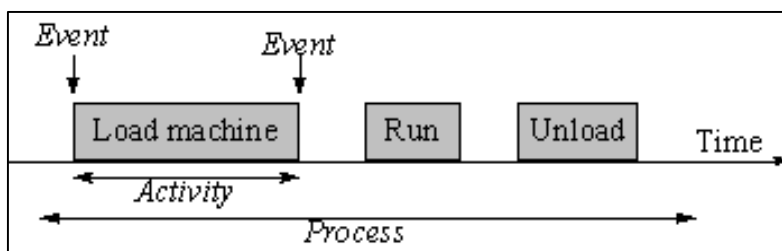


Fig. 2.7.1.2 Diferentes maneras de describir la lógica de los modelos orientados a eventos discretos. (*Fuente: Kreutzer, 1986*)

El enfoque de eventos discretos describe un evento como un cambio instantáneo. Este tipo de eventos suelen aparecer acompañados tal y como se muestra en el diagrama (inicio de la carga de la máquina y fin de la carga). En cambio, las actividades describen una duración, por ejemplo, el tiempo de carga de la máquina. Por último un proceso es una colección de eventos o actividades que describen un ciclo de vida de una entidad, en este caso una máquina.

El enfoque de evento es fácil de entender y eficiente computacionalmente pero es más difícil de implementar que el enfoque de actividad. En el enfoque de la actividad, mientras que es un concepto relativamente fácil de entender sufre de una pobre eficiencia en la ejecución. El proceso es menos común y requiere más planificación para su implementación correcta aunque está enfocado a la eficiencia.

Proceso lógico de la estructura de ejecución de eventos

El enfoque de la simulación de eventos puede verse descrita a continuación en la figura 2.7.1.3. El diagrama muestra los dos elementos esenciales el reloj y la lista de eventos (con su función ejecutiva). De esta manera, la simulación utilizará la lista de eventos (eventos ordenados cronológicamente), para avanzar la simulación.

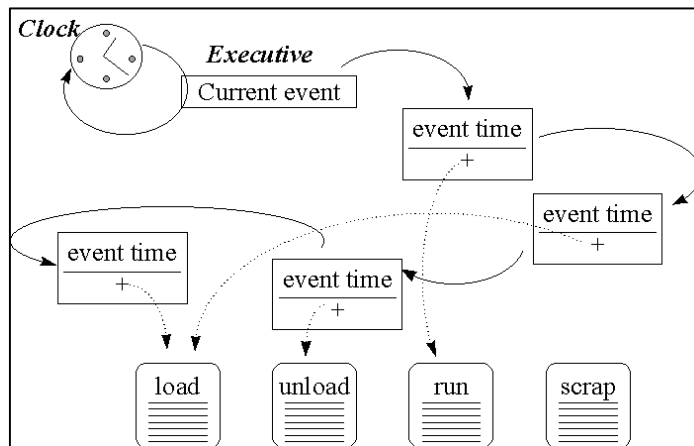


Fig. 2.7.1.3 Detalle del proceso de simulación orientado a eventos discretos
(Fuente: Kreutzer, 1986)

La herramienta ejecutiva, es responsable de ordenar los eventos. De esta manera, se ejecuta la lógica del primer elemento de la lista que a continuación se elimina. Los nuevos eventos que se producen como resultado de la ejecución anterior, serán insertados en la lista siguiendo una distribución cronológica. Este ciclo es repetitivo en forma de bucle hasta que se alcance la condición de fin.

Cada uno de los eventos de la lista de ejecución contiene dos elementos de datos. El primer elemento contiene el tiempo de simulación del evento, permitiéndole ser ordenado en la lista de eventos. El segundo, contiene la referencia a la lógica del modelo que debe ser ejecutada. Este hecho permite a la herramienta ejecutiva establecer la lógica correcta en el momento correcto.

A modo de síntesis, a continuación se presenta (de forma esquemática) el proceso que sigue la simulación orientada a eventos discretos:

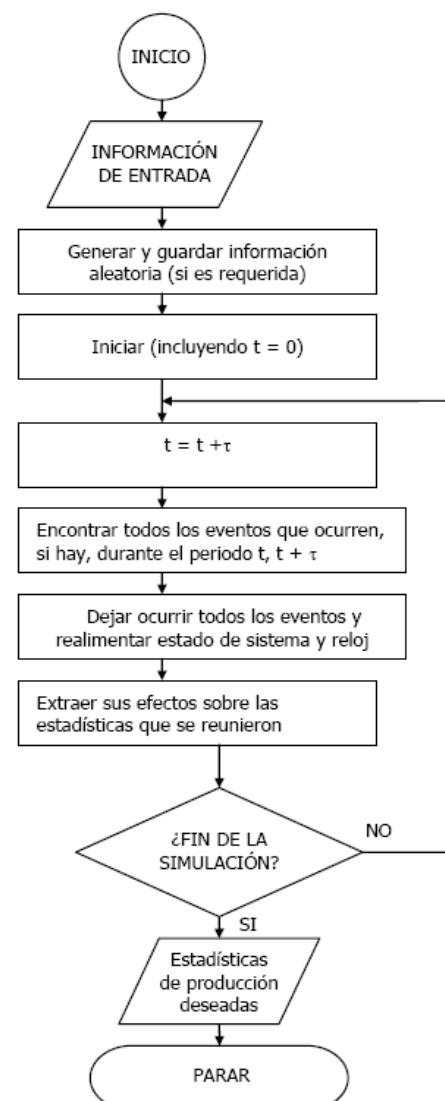


Fig.2.7.1.4. Proceso de simulación orientada a la simulación de eventos discretos. (Fuente: Kreutzer, 1986)

Inicio

- Se inicializa la condición de fin en Falso. Es decir, hasta que esta variable booleana no cambie de valor la simulación continuara ejecutándose.
- Se inicializan las variable de estado del sistema.
- Se inicializa el reloj (habitualmente la simulación se inicia en el instante 0).
- Programar un evento inicial, es decir, poner un poco de evento inicial en la Lista de Eventos.

Mientras la variable de condición de fin tenga valor “falso” repetir el siguiente proceso:

- Ajustar el reloj a la hora del siguiente evento.
- Ejecutar el próximo evento y retirar de la lista de eventos.
- Actualización de la lista de eventos y de las estadísticas.

Cuando se alcance la condición de fin (condición de fin es igual a “verdadero”)

- Se obtienen los datos de la simulación y se genera el reporte estadístico.

Herramientas y software de simulación orientada a eventos discretos (DES)

Existen diversas herramientas y software que actúan como marco para la simulación orientada a eventos discretos. A continuación se presentan tres herramientas que destacan por su gran aceptación comercial:

- **Anylogic:** Es una herramienta que fue desarrollada por la compañía *XI technologies* que incluye gran parte de los métodos de simulación mas comunes utilizados hoy en día (Sistemas dinámicos, Simulación orientada a eventos discretos, Simulación basada en agentes).
El disponer de los métodos mas utilizados, le aporta una gran flexibilidad permitiéndole capturar los sistemas mas complejos y heterogéneos con cualquier nivel de detalle deseado (dado que además posee una interfaz gráfica muy potente). El hecho de disponer además de un gran numero de librerías y herramientas hacen que sea de gran facilidad modelar rápidamente sistemas de aéreas como la logística, los recursos humanos, la gestión de procesos etc. Como virtudes de Anylogic cabe destacar, el hecho de que reduce el tiempo y los costes de desarrollo, permite desarrollar diversas técnicas con un único software, no requiere de una capacidad de computación muy alta etc.
- **Arena:** Arena es un software de modelado y simulación de eventos discretos desarrollado por *Rockwell Automation* en el año 2000. En Arena, el usuario construye un modelo mediante la utilización de módulos que representan los diferentes procesos o lógicos, que a la vez son unidos entre si para especificar el flujo. Arena es utilizado por grandes empresas, en la simulación de procesos de negocio. Algunas de estas empresas son General Motors, UPS, IBM, Nike, Xerox, Lufthansa, Ford Motor Company, y otros.

- **Tecnomatix – Plant Simulation:** Plant Simulation es una herramienta desarrollada por Siemens Software que permite modelar, simular, analizar, visualizar y optimizar los sistemas y procesos de producción, el flujo de materiales y operaciones logísticas.

Plant Simulations es un software de simulación del flujo de materiales orientado a la simulación de eventos discretos (DES). Mediante el uso de la simulación, permite evaluar mediante decisiones matemáticas, sistemas empresariales complejos.

2.7.2. Simulación basada en agentes

En la simulación basada en agentes (a partir de ahora ABM “*Agent based modelling*”), un sistema es modelado como una colección de entidades de toma de decisiones autónoma llamadas agentes.

Cada uno de estos agentes evalúa de manera individual su situación y toma decisiones teniendo como base un conjunto de reglas. En este caso no existe un núcleo de control central dentro del modelo que defina el comportamiento, los movimientos o las interacción.

Los agentes, pueden ejecutar diferentes comportamientos dependiendo del sistema que representan, por ejemplo en una cadena de suministro pueden actuar como consumidores, productores o vendedores. Una característica importante en los modelos basados en agentes es la interacción entre estos agentes que permite explorar dinámicas o comportamiento fuera del alcance de métodos matemáticos. En conclusión, los agentes son unidades con diferentes características, capaces de tomar decisiones de forma autónoma. En este caso, la toma de decisiones de cada agente sigue un conjunto de reglas y atributos únicos definidas para cada una de las entidades.

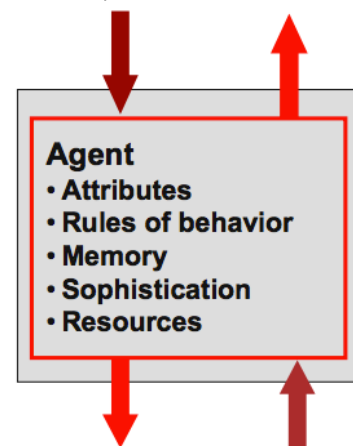


Fig.2.7.2.2.Representación de un agente y sus elementos(**Fuente:** Argonne National Laboratory)

Por lo tanto, en el nivel mas simple, un modelo basado en agentes consiste en un sistema de agentes y las relaciones que se dan entre estos. No obstante, incluso un simple modelo basado en agentes, puede exhibir patrones de conducta completos y proporcionar información sobre la dinámica del sistema que se pretende emular. Además, los agentes pueden ser capaces de evolucionar, permitiendo comportamientos imprevistos.

En definitiva, un modelo basado en agentes consiste en los siguientes aspectos:

1. Un conjunto de agentes
2. Un conjunto de relaciones entre los agentes previamente definidos
3. Un marco o herramienta que permita la simulación del comportamiento de los agentes, así como sus interacciones.

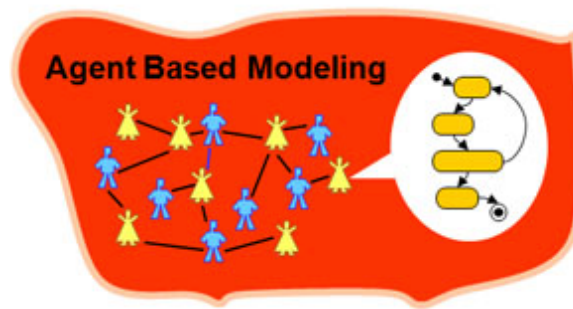


Fig.2.7.2.2. Representación de los elementos y las relaciones dentro de un modelo basado en agentes. (**Fuente:** Anylogic.com/agent-based-modeling)

En relación a las herramientas, de ámbito general, necesarias para establecer el marco de simulación existen diversas opciones que se presentan a continuación:

- **Repast:** *Recursive Porous Agent Simulation Toolkit (Repast)* es una herramienta de modelado y simulación basada en agentes, de código abierto, altamente utilizada. Fue originalmente desarrollada por Michael North et al. en la "University of Chicago".
Sus principales virtudes son variedad de agentes ya definidos existentes, su completa orientación a objetos, herramientas gráficas y de análisis, posibilidad de modelar comportamiento en redes sociales, implementación en Java etc.
- **NetLogo:** Es un lenguaje de programación basado en agentes que incluyen un entorno de modelado. Netlogo fue diseñado como herramienta educativa en el ámbito de la programación basada en agentes. Una de las ventajas que ofrece es el hecho de que contiene extensas librerías con modelos de diversos ámbitos como economía, biología, física, dinámicas de sistemas etc.
- **Anylogic:** Tal y como se especifica en el apartado anterior, Anylogic ofrece un marco para la simulación basada en agentes.

Actualmente, dado que vivimos en un mundo cada vez mas complejo existe una gran necesidad de utilizar simulaciones basadas en agentes. Este hecho es debido a diversos factores como los que se presentan a continuación:

- Los sistemas son cada vez mas complejos y la dificultad de analizarlos esta aumentando considerablemente. Además constantemente se esta incrementando las interdependencias entre elementos físicos y económicos, lo que aumenta aún mas, si cabe, su complejidad.

- Empiezan a existir nuevas herramientas y técnicas de modelado basadas en agentes que antes no podían ser analizadas y ahora si.
- La cantidad de datos de los que se nutren los modelos es cada vez mayor.
- Los avances en potencia computacional permiten el uso de simulaciones que requieren una mayor potencia de computación, como la simulación por agentes.

2.7.3. Simulación de dinámica de sistemas (sistemas dinámicos)

Según afirma *John Sterman*⁵, la simulación de sistemas dinámicos es una perspectiva, así como un conjunto de herramientas que nos permiten entender la estructura y la dinámica de sistemas dinámicos complejos. Se trata de un riguroso método de modelado que nos permite construir simulaciones formales por ordenador de sistemas complejos para que estas sean utilizadas posteriormente para diseñar políticas y organizaciones mas efectivas. Estas herramientas nos permite por lo tanto crear modelos donde el espacio y el tiempo puedan ser comprimidos y ralentizados ofreciendo un visión de los efectos, decisiones o desarrollos que aporten éxito.

En definitiva la simulación de eventos dinámicos es una aproximación que permite entender el comportamiento de sistemas complejos a lo largo del tiempo. La simulación se basa en determinar cuales son los bucles de retroalimentación⁶ y los retrasos de información que afectan al comportamiento del sistema en conjunto. El hecho diferenciador de este tipo de simulación respecto a otras herramientas para el estudio de sistemas complejos es el uso de modelos matemáticos y los ciclos de retroalimentación. Por lo tanto se define como una técnica de simulación desarrollada en 1950 por *Jay Forrester (Michigan Institute of Technology (MIT))* para analizar y gestionar situaciones y problemas complejos.

La metodología de simulación de sistemas dinámicos es típicamente utilizada en el modelado de sistemas a largo termino o estratégicos, dado que asume un alto nivel de agregación de los objetos modelados. Este tipo de modelos permite representar desde personas, productos, eventos, así como otros elementos con un alto nivel de abstracción.

Los elementos principales de un sistema dinámico son los diagramas de retroalimentación causal, los diagramas de flujo y las demoras y ecuaciones temporales.

⁵ **STERMAN, J. (2000)** "*Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*". Irwin/McGraw-Hill c2000.

⁶ **Bucle de retroalimentación (Feedback loop):** El camino completo que va desde la detección inicial del desfase de información a la modificación de este desfase.
(Fuente: <http://serc.carleton.edu/introgeo/models/loops.html>)

- **Diagramas de retroalimentación causal:** Es un diagrama sencillo que representa un sistema con todos sus elementos e interacciones. Capturando las interacciones (retroalimentación) el diagrama mejora la comprensión del sistema.

A continuación en la figura 2.7.3.1 se presenta un ejemplo de diagrama de retroalimentación causal. Este diagrama cuenta con dos retroalimentaciones. En primer lugar encontramos una retroalimentación positiva que define que, a mayor numero de nacimientos, mayor numero de defunciones. Y la segunda retroalimentación define que la población depende del número de nacimientos y defunciones.

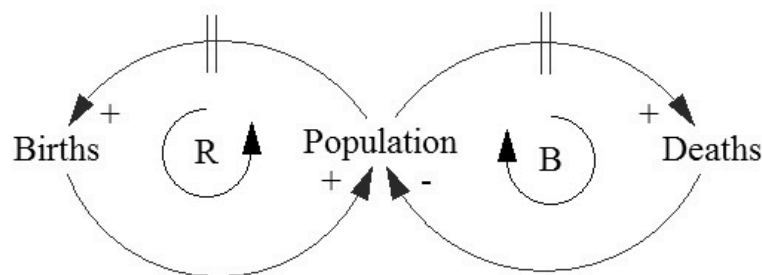


Fig. 2.7.3.1. Ejemplo de diagrama de retroalimentación causal.

(Fuente: <http://systemsandus.com/2012/08/15/learn-to-read-clds/>)

- **Diagramas de flujo:** Los diagramas de retroalimentación causal, ayudan a visualizar la estructura y el comportamiento del sistema. Para mejorar el análisis cuantitativo del sistema el diagrama de retroalimentación puede transformarse en un diagrama de flujo.

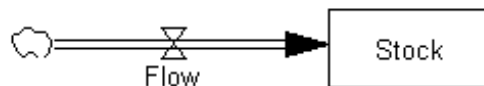


Fig. 2.7.3.2. Ejemplo de un diagrama de flujo en la simulación de sistemas dinámicos

(Fuente: <http://systemsandus.com/2012/08/15/learn-to-read-clds/>)

- **Ecuaciones y demoras temporales:** Se definen un conjunto de ecuaciones en tiempo discreto o continuo, que representan el poder real de este tipo de simulación. Calculan e identifican los flujos en el diagrama.

La simulación de dinámicas de sistemas presenta aplicaciones en una amplia gama de áreas como son el análisis de poblaciones, sistemas ecológicos y económicos y otros sistemas que presenten una fuerte interacción entre sí.

3. SIMULACIÓN ORIENTADA A LA AERONÁUTICA. MODELADO Y SIMULACIÓN DEL AEROPUERTO INT. DE BARCELONA- EL PRAT

3.1. INTRODUCCIÓN A LA SIMULACIÓN AEROPORTUARIA

No hace mucho tiempo atrás, la simulación aeroportuaria se posicionaba como un concepto desconocido para la planificación y gestión de las infraestructuras aeroportuarias. Estas herramientas tenían un nivel de aceptación bajo por parte de los ingenieros, planificadores y gestores de la época generando duda y desconfianza.

Este hecho empezó a cambiar a partir del año 1990 cuando se empezaron a realizar proyectos de investigación relacionados con las técnicas de modelado y simulación, considerándolas como herramientas de ayuda a la comprensión de sistemas complejos aeroportuarios. De esta manera investigadores e ingenieros del sector del transporte aéreo se unieron para explorar los aspectos prácticos de la simulación y su utilización como herramienta útil para la planificación de aeropuertos (tanto la zona aire como la zona tierra), así como su aplicación en la gestión de la operativa diaria del aeropuerto.

Hoy en día, no existe prácticamente ningún aeropuerto en el mundo que no utilice, en mayor o menor grado, las herramientas de modelado y simulación. Por lo general, actualmente, el modelado y simulación de aeropuertos aborda esencialmente dos grandes componentes del aeropuerto: el subsistema aéreo y el terrestre.

3.2. PROPÓSITO ESPECÍFICO DE LA SIMULACIÓN – HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN AERONÁUTICAS Y AEROPORTUARIAS

Tomando como referencia los objetivos de la simulación comentados en apartados anteriores, la simulación tiene como objetivo principal llevar a cabo experimentos en un modelo(sistema), con el objetivo de entender el comportamiento del sistema representado y de esta manera, evaluar diferentes alternativas que mejoren su eficiencia y su operación. A su vez, como también se ha comentado anteriormente, una de las ventajas de la simulación, radica en el hecho de que permite experimentar con sistemas o situaciones que podrían suponer un coste elevado.

Imaginemos por un instante, el coste que supone para una infraestructura aeroportuaria evaluar la capacidad del campo de vuelo o terminal utilizando métodos tradicionales, como podrían ser: el uso de figurantes o el uso de aeronaves.

A grandes rasgos, tal y como se resume a continuación, las técnicas de modelado y simulación ofrecen una amplia gama de beneficios a la industria aeronáutica y aeroportuaria dado que:

- Las nuevas técnicas de simulación permiten obtener un alto nivel de precisión en la descripción y construcción del modelo, permitiendo que este sea utilizado con diversos fines en el ámbito aeronáutico tales como: análisis “*what-if*” (realizar un ensayo con diferentes configuraciones de escenarios operativos con el fin de encontrar la mejor solución), optimizar los recursos necesarios (lo que puede conllevar una significativa reducción de costes), tareas de formación etc.
- Las herramientas de simulación ofrecen una atractiva interfaz gráfica, que permite exponer y vender de forma fácil nuevas ideas, conceptos o proyectos a clientes o tomadores de decisiones.
- Permite probar nuevas configuraciones aeroportuarias (utilización de salidas de pista, puntos de espera, *routing* de aeronaves, aumentos de capacidad del campo de vuelo, evitar la aparición de cuellos de botella en la infraestructura etc.) sin tener que soportar grandes inversiones.
- Permite incrementar el conocimiento acerca de un proceso dinámico. Complejas interdependencias de tráfico pueden ser también analizadas y optimizadas.

Si bien la mayor parte de los software de modelado y simulación de carácter general existentes actualmente, son capaces de ofrecer los beneficios descritos anteriormente, el uso de software de propósito específico orientado al modelado de sistemas aeroportuarios ayuda a reducir el tiempo dedicado a la construcción del modelo.

Actualmente, existen en el mercado diferentes software orientados a la simulación de aeropuertos. A continuación se procede a comentar los mas importantes:

- **CAST Airport Simulation (Airport Research Center):** CAST esta configurado con herramientas que permiten reflejar una imagen realista de cualquier sistema aeroportuario, pudiendo simular cualquier proceso o trafico logístico dentro del aeropuerto. CAST es una herramienta modular, que se compone de diversas aplicaciones: Simulación de Terminal(CAST Terminal), Simulación de Handling (CAST Vehicle) y Simulación del trafico de Aeronaves (CAST Aircraft). CAST se basa en la tecnología de simulación orientada a multi- agentes.

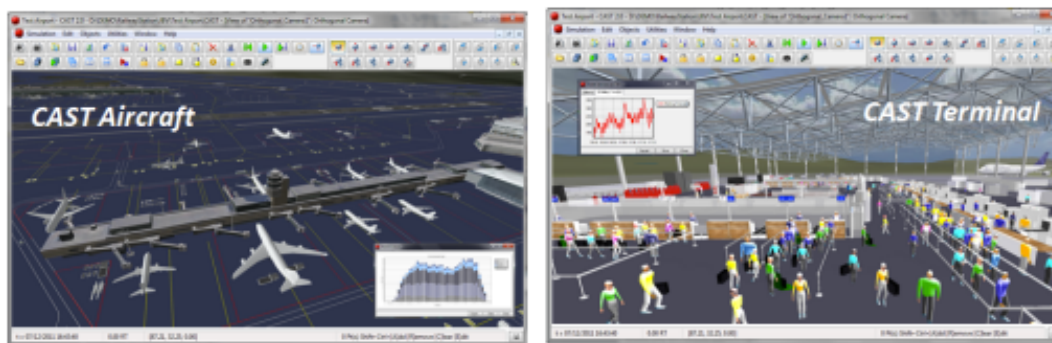


Figura 3.2.1 Ejemplos de simulación de zona terminal (CAST Terminal) y zona aire (CAST Aircraft). (**Fuente:** <http://www.airport-consultants.com/>)

- **ARCPort Alto (Aviation Research Center):** Permite crear potentes modelos de terminales de aeropuertos (simulación de movimiento de pasajeros y terminales), zonas de operaciones, modelado de aeronaves, espacio aéreo, movimiento de servicios de handling en la plataforma etc. Se pueden resumir las capacidades de ARCPort Alto en los siguientes puntos:
 - Simulación de la terminal y la zona aire.
 - Visualización en animación 3D del aeropuerto y de la zona de operaciones.
 - Facilidad para implementar y testear diferente configuraciones
 - Posibilidad de obtener KPI's en relación al modelo.
 - Asignación dinámica de puestos de estacionamiento de aeronaves.

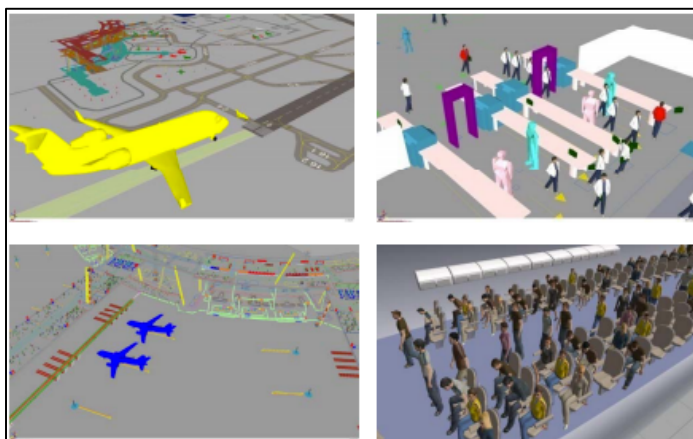


Fig.3.2.2 ARCPort Alto ofrece la posibilidad de simular el lado aire, la terminal y el flujo de pasajeros dentro de la aeronave. (**Fuente:** <http://www.arc-us-ca.com/>)

- **SIMWALK Airport:** *Simwalk Airport*, es un software especializado de simulación de tráfico de pasajeros orientado a la aviación. *Simwalk* ofrece un proceso de modelado realista así como la optimización de todas las operaciones de pasajero en la terminal del Aeropuerto. Ofrece además, la posibilidad de analizar las capacidades y logísticas de los pasajeros, ensayo de nuevas configuraciones aeroportuarias, congestiones y colas en los diferentes niveles de servicio (IATA).



Fig. 3.2.3 Control de pasaporte aeroportuario, simulado con software SIMWALK
(Fuente: Simwalk.com)

3.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y CONCEPTUALIZACIÓN DEL MODELO

En este apartado se pretende definir el problema a resolver y los objetivos que se persiguen en el proyecto. Además se muestran algunos datos generales del Aeropuerto Internacional de Barcelona – El Prat (sistema que se encuentra bajo estudio) así como generalidades que tienen como propósito familiarizarse con la operación del aeropuerto.

Se analizaran también, de manera breve, las posibles problemáticas operativas que se pueden dar en el aeropuerto de Barcelona. Finalmente, se determina el modelo conceptual a utilizar, en donde se indican aspectos que serán representados en el modelo y su nivel de detalle.

3.3.1 Formulación del problema

El aeropuerto internacional de Barcelona-El Prat (en adelante LEBL) es uno de los aeropuertos de mayor importancia de España, como también lo son los aeropuertos de Málaga, Madrid o Palma de Mallorca. Cabe destacar que el aeropuerto de Barcelona-El Prat ocupa el segundo puesto en el movimiento aeroportuario nacional, atendiendo (en el año 2011) a un 16,83% de los pasajeros y a un 14,16% de las operaciones de aviación comercial del país. (ver tabla 3.3.1.1)

| MOVIMIENTO DE PASAJEROS (Millones de Pasajeros) | | |
|--|-----------------------------------|-------------------|
| Aeropuerto | Pasajeros totales 2011 | Porcentaje |
| Aeropuerto Int. Madrid-Barajas | 49.671 | 24,30% |
| Aeropuerto Int. Barcelona-El Prat | 34.398 | 16,83% |
| Aeropuerto Int. Palma de Mallorca | 22.726 | 11,11% |
| Aeropuerto Int. Málaga-Costa del Sol | 12.823 | 6,27% |

Tabla 3.3.1.1 Movimiento de pasajeros en los cuatro aeropuertos con mayor tráfico de pasajeros del estado español en 2011. (Fuente: Elaboración propia. Datos anuales de AENA)

Si bien, teniendo en cuenta las ampliaciones realizadas en los últimos años⁷ en el aeropuerto, este no presenta una saturación o congestión en pistas, puestos de atraque de aeronaves o espacio aéreo, se pueden observar problemas operacionales menores que pueden afectar a la operativa diaria.

Es importante lograr un elevado nivel de eficiencia en su operación. Por lo tanto, es necesario poseer herramientas que permitan evaluar el comportamiento del aeropuerto. Tal y como se ha establecido en apartados anteriores, los modelos de simulación, son una de estas herramientas, por lo que se plantea, ahora, la necesidad de desarrollar un modelo de simulación que permita realizar este tipo de evaluaciones. Las ventajas que esto implica ya han sido mencionadas en los apartados anteriores.

3.3.2 Objetivos del proyecto

El objetivo de este proyecto es, por lo tanto, desarrollar un modelo de simulación del lado aire⁸ del Aeropuerto Internacional de Barcelona-El Prat, para posteriormente poder realizar diversos experimentos dirigidos a obtener información acerca del comportamiento del sistema, con el objetivo de detectar posibles problemas operativos culpables de reducir la eficiencia del aeropuerto como sistema.

Para ello, el modelo propuesto deberá simular de forma precisa el conjunto de operaciones, aeronaves y interacciones que se den en el aeropuerto.

3.3.3 Datos y características generales del Aeropuerto⁹ Internacional de Barcelona-El Prat

- **Nombre:** Aeropuerto Internacional De Barcelona-El Prat
- **Ubicación:** El Prat del Llobregat (Barcelona)
- **Distancia al centro de Barcelona:** 10 kilómetros en dirección NE.
- **Clasificación:** Internacional
- **Código IATA /OACI:** LEBL/ BCN
- **Superficie:** 1533 hectáreas.
- **Horario de Operación:** 24 horas
- **Numero de pistas:** 3 (2 paralelas y una transversal)

⁷ **Plan Barcelona:** El plan de expansión (Plan Barcelona) incluía la construcción de una segunda terminal (Terminal 1) y una torre de control adicional. Además una pista adicional fue construida (07R/25L). Una vez estos desarrollos fueron finalizados en el año, el aeropuerto es capaz de dar capacidad a 55 millones de pasajeros anuales (comparados con los 33 millones del año 2003). (*Fuente: AENA – Aeropuerto de Barcelona*)

⁸ **Lado aire:** Incluye la pista (para despegues y aterrizajes), las pistas de rodaje, los hangares y las zonas de estacionamiento de aeronaves (Apron). (*Fuente: Propia*)

⁹ **Aeropuerto:** es un aeródromo civil de servicio público, que cuenta con las instalaciones y servicios adecuados para la recepción y despacho de aeronaves, pasajeros, carga y correo del servicio de transporte aéreo regular, del no regular, así como del transporte privado comercial y privado no comercial. (*Fuente: Real Academia- Aeropuerto*)

- **Dimensión pista 25R/07L:** 3.352 metros
- **Dimensión pista 25L/07R:** 2.660 metros
- **Dimensión pista 02/20:** 2.528 metros
- **Capacidad de pistas:** 90 operaciones/hora
- **Número de posiciones de estacionamiento:** 168 posiciones
- **Superficie Terminales:** 580.000 m²

Como ya se ha comentado anteriormente el aeropuerto de Barcelona se sitúa en la actualidad como el segundo aeropuerto de España en numero de trafico de pasajeros. Durante el periodo que abarca de 1996 a 2005 fue el segundo aeropuerto de Europa en crecimiento del numero de pasajeros. Además el puente aéreo (Barcelona-Madrid), hasta el año 2008 se consolidaba como la ruta mas congestionada del mundo con alrededor de 971 frecuencias semanales. Después de las olimpiadas en el año 1992 el trafico ha aumentado mas de un 240% pasando de alrededor de 10 millones en ese año hasta los mas de 34 millones del pasado año 2011 (Después de la ampliación llevada a cabo por el plan Barcelona, que se explica a continuación). De esta manera con mas de 34 millones de pasajeros en 2011, se posiciona como el noveno aeropuerto en numero de pasajeros de Europa.

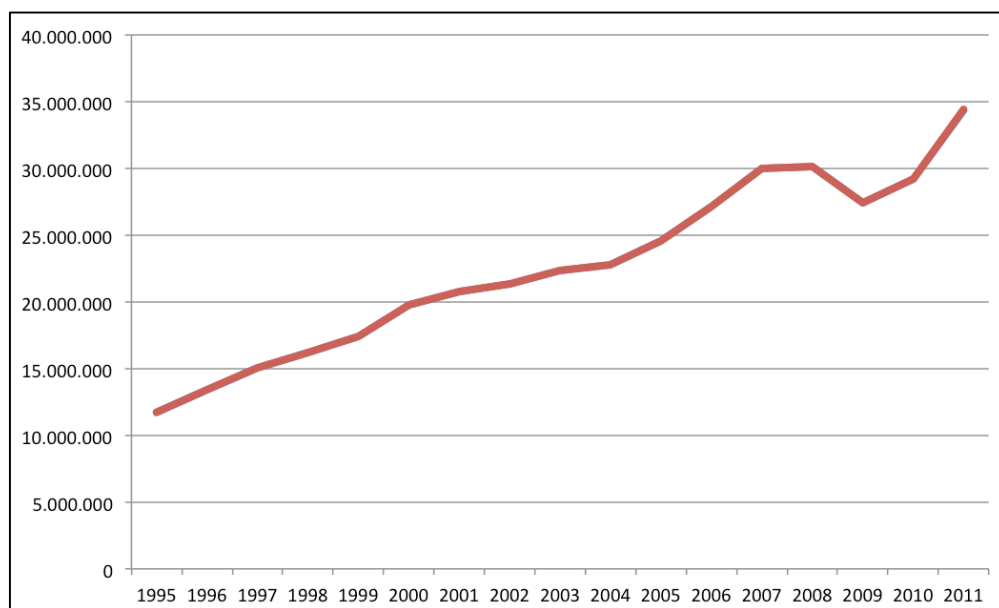


Gráfico 3.3.3.1 Evolución del número de pasajeros del aeropuerto de Barcelona (1995-2011)
(Fuente: AENA)

Este alto crecimiento se debe en gran parte al anteriormente mencionado “Plan de expansión Barcelona”. Este plan como objetivo construir una nueva pista paralela a la existente 25R/07L, una nueva terminal situada entre las dos pista paralelas y una nueva torre de control (estas obras finalizaron en el año 2009), además de la construcción de una conexión de metro entre la ciudad y el aeropuerto, la conexión de la línea de alta velocidad y una mejoras de las conexiones de cercanías (todavía en construcción).

De esta manera, tal y como se puede observar en la figura 3.3.3.2 los objetivos fijados con estos planes de ampliación pretenden establecer el Aeropuerto de Barcelona como un aeropuerto *hub*¹⁰ con capacidad para mas de 90 operaciones a la hora y alrededor de 52 millones de pasajeros anuales (antes del año 2020).

| | Before the Enlargement | Future Enlarged Airport |
|----------------------------|------------------------|------------------------------------|
| Airport Surface | 845 Ha. | 1.533 Ha. |
| Terminal Surface | 103,000 m2 | 580,000 m2 |
| Operations per hour | 52 op/h. | 90 op/h. |
| Passenger Capacity | 23 M PAX / year | 52 M PAX / year |
| Runways | 2 crossed runways | 2 parallel runways + 1 transversal |
| Airplane Platform Capacity | 70 positions | 168 positions |
| Check-in Desks | 113 | 300 |
| Conveyor Belts | 14 | 33 |
| Cargo Terminal Surface | 35,000 m2 | 160,000 m2 |
| Cargo Capacity | - | 500,000 tones / year |
| Aeronautic Park | - | 50 ha. |
| The City | - | 150 ha. |

Fig. 3.3.3.2 Datos característicos del aeropuerto. Antes y después de la ampliación. (Fuente: AENA)

A Noviembre de 2012 era posible volar a 117 ciudades diferentes en 51 países (incluyendo España) con 69 aerolíneas diferentes. El tráfico aéreo en Barcelona, se encuentra dominado por las aerolíneas “*Low Cost*”, representando el 56% del numero total de pasajeros. En este caso las aerolíneas dominantes del aeropuerto son (según AENA) en primer lugar Vueling con un 29,8% de cuota de mercado, seguido por Ryanair (14,6%), Easyjet (7,2%) en tercer lugar y finalmente Iberia en cuarto lugar con únicamente un 4% (opera únicamente la ruta de puente aéreo). Como se puede observar en los últimos años el tráfico de la “*Low-Cost*” ha crecido de manera importante en Barcelona, especialmente tras la creación de bases operativas por parte de compañías como Vueling, Easyjet, Transavia, Wizzair o Ryanair.

Por otra parte, la mayor parte del tráfico del aeropuerto de Barcelona es doméstico, europeo y norteafricano. El número de conexiones intercontinentales es inferior a la media de otros aeropuertos europeos con su nivel de tráfico de pasajeros, ya que sólo cuenta con 30 (de las cuales 10 son de corto radio). Las rutas mas importantes servidas desde el aeropuerto de Barcelona son Madrid-Barajas, Palma de Mallorca y Sevilla para rutas nacionales, y Amsterdam-Schipol, Paris-Charles de Gaulle y Paris Orly para rutas internacionales.

¹⁰ **Aeropuerto Hub:** Es un aeropuerto que una aerolínea usa como punto de transferencia para cubrir sus destinos. Su utilidad deriva de un modelo en donde los pasajeros que viajan entre aeropuertos que no son servidos por vuelos directos cambian de aeronave camino a su destino. (Fuente: Diccionario RAE- Hub)

3.3.4 Aspectos generales sobre la operativa de la zona aire del Aeropuerto Int. de Barcelona- El Prat

A continuación se pasan a detallar los aspectos relacionados con la operativa de la zona aire del aeropuerto de Barcelona con el objetivo de comprender, como se realiza el movimiento de aeronaves en el campo de vuelo. Como ya hemos comentado anteriormente el aeropuerto de Barcelona consta de tres pistas: dos paralelas (25R/07L y 25L/07R) y una pista transversal (02/20).

Tal y como especifica la Información Aeronáutica del aeropuerto (AIP) la dirección operativa del aeropuerto se registrará siempre por la configuración preferente, siempre y cuando se cumplan las condiciones de seguridad que así lo permitan (lluvia, techo de nubes, visibilidad, viento etc.).

La configuración preferente establece lo siguiente, para un horario comprendido entre las 0700 horas y 2300 horas local:

- Se utilizara una configuración de pista Oeste en pistas paralelas. Es decir:
 - Las operaciones de llegadas se realizaran por la pista 25R.
 - Las operaciones de salida se realizaran por la pista 25L. Se permitirá el uso de la pista 25R para salidas, a aquellas aeronaves que puedan justificar que necesitan mayor longitud de pista que la disponible en la pista.

Por el contrario en caso de no cumplirse las condiciones mínimas de seguridad que permiten se el uso de la configuración estándar, se establece la siguiente configuración no preferente (entre las 0700 y 2300 horas local):

- Se utilizara una configuración de pista Este en pistas paralelas. Es decir:
 - Las operaciones de llegadas se realizaran por la pista 07L.
 - Las operaciones de salida se realizaran por la pista 07R. Se permitirá el uso de la pista 07L para salidas, a aquellas aeronaves que puedan justificar que necesitan mayor longitud de pista que la disponible en la pista.

De igual manera, se establecerá una nueva configuración operativa entre las 2300 y 0700 horas local, con el objetivo de reducir los efectos nocivos de ruido en las poblaciones vecinas al aeropuerto.

- En caso de configuración preferente, se utilizara la configuración Norte con pistas cruzadas. Es decir:
 - Las operaciones de llegadas se realizaran por la pista 02.
 - Las operaciones de salida se realizaran por la pista 07R.

- En caso contrario (configuración no preferente), se utilizara la configuración Oeste con pista única activa.
 - Las operaciones tanto de salida como de llegada se realizaran por la pista 25L.

De manera esquemática, la siguiente figura (figura 3.3.4.1) muestra de manera simplificada las diferentes configuraciones presentadas anteriormente:

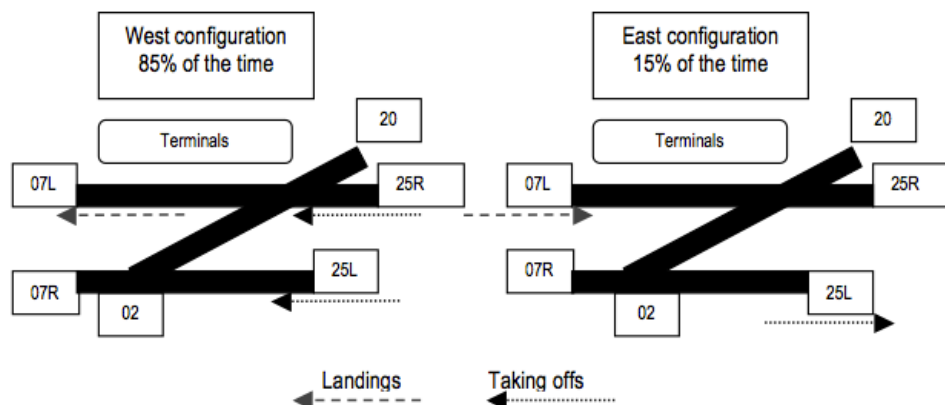


Fig. 3.3.4.1 Configuración operativa de las diferentes pistas del aeropuerto de Barcelona. *(Fuente: Airport Information Publications- AENA)*

En la figura 3.3.4.2 se puede observar de manera general los detalles de localización de las pistas, las calles de rodajes, los puntos de espera etc. del aeropuerto. Cabe destacar, tal y como se observa en la figura la disposición paralela de las pistas y su cercanía relativa. Esta corta distancia de separación entre las dos pistas (que es de tan solo 1100 metros), lo cual no permite realizar operaciones simultáneas de aterrizajes y despegue, sino que solo permite operaciones secuenciales¹¹.

¹¹ Según el volumen del anexo 14 del convenio de Chicago de OACI dos pistas paralelas deben tener una distancia mínima entre ellas de 1910 metros para poder realizar operaciones simultáneas de despegue o aterrizaje. *(Fuente: OACI)*

Este hecho puede generar situaciones puntuales de congestión, dado que, tal y como muestra el gráfico, existen instantes puntuales de tiempo en los que el aeropuerto se encuentra operando al borde de su capacidad máxima. Por consiguiente es probable que aumenten los tiempos de rodajes de las aeronaves, los tiempos en los puntos de espera para despegue, la congestión en los cruces de pistas, el tiempo de rodaje de las aeronaves entrantes etc. Lo que como resultado genera un aumento de los retrasos y una pérdida de eficiencia.

Juntamente con esta concentración de los vuelos, el Aeropuerto de Barcelona (dado su carácter turístico) sufre de una alta estacionalidad de los vuelos lo que significa que existen épocas del año en las que el aeropuerto se encuentra trabajando con una carga de trabajo más elevada mientras que en otras épocas esta carga de trabajo se encuentra altamente reducida.

3.3.6 Requerimientos y conceptualización del modelo

Se puede asumir que el sistema de interés (en este caso la zona aire del aeropuerto de Barcelona) esta formada por un conjunto de agentes, en este caso aeronaves, (que despegan o aterrizan basándose en un horario) y una infraestructura específica (calles de rodaje, puestos de estacionamiento, pistas).

Tanto los agentes, como la infraestructura estarán regidos por una serie de restricciones operativas, definidas por la leyes aeroportuarias generales y específicas.

Los agentes (aeronaves), serán capaces de actuar de manera autónoma, si bien, estos interactuarán con los demás agentes permitiendo, de esta manera, el intercambio de información.

A su vez, el modelo, se compone de diversos subsistemas que unidos conforman el sistema aeroportuario de Barcelona. Entre estos diversos subsistemas destacamos los siguientes:

- Subsistema de control de despegue y aterrizajes (AMAN¹²-DMAN¹³)
- Subsistema de gestión de puestos de estacionamiento.
- Subsistema de control de rodadura.
- Subsistema de gestión del tiempo.

¹² **AMAN:** Arrival Management System.

¹³ **DMAN:** Departure Management System.

3.4. ELECCIÓN DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN

Una vez definidas las necesidades y objetivos en relación al proyecto, así como realizada la conceptualización del modelo, es necesario identificar y definir el software que se utilizara para modelar y simular el sistema.

Dado que se trata de un sistema que contiene agentes (aeronaves), el software a utilizar debe ser uno que permita una simulación orientada a agentes. Además dada la complejidad del sistema, el hecho de contar con un software orientado a un propósito específico (en este caso el sector aeroportuario) facilitara el trabajo y reducirá el tiempo de modelado respecto a si se utilizara un software de simulación carácter general.

Por lo tanto, atendiendo a las necesidades de software propuestas, se encuentra el software de simulación *CAST Airport Simulation* producido y distribuido por la empresa *Airport Research Center GmbH (ARC)*. *Airport Research Center GmbH (ARC)* es un proveedor independiente y global de soluciones de consultoría en el ámbito de la aviación y los aeropuertos. A su vez, con el software de simulación *CAST Airport Simulation* ofrece un productor líder, que tiene como objetivo optimizar y reducir los costes operacionales en el ámbito aeronáutico y aeroportuario.

La compañía define la herramienta CAST, como un sistema de simulación de altas prestaciones basado en los requerimientos fijados por el propio usuario. El objetivo de este sistema, es, proveer un software de simulación que utilizando las ultimas tecnologías, sea capaz de ofrecer alta calidad y eficiencia.

CAST se basa en la tecnología de simulación orientada a multi- agentes. Cada uno de los agentes representa un actor (p.ej. un pasajero, un vehículo o una aeronave) siendo este capaz de reaccionar a las situaciones dadas según sus características individuales. En general todos los agentes son capaces de llevar a cabo todos los procesos de manera independiente. Mientras los agentes se mueven, interactúan con otros objetos para evitar conflictos teniendo en cuenta las restricciones fijadas. Cada agente posee propiedades individuales que determinan su comportamiento, haciendo que en situaciones similares, los comportamientos observados difieran.

A su vez, esta configurado con herramientas suficientes que permiten reflejar una imagen realista de cualquier sistema aeroportuario, pudiendo simular cualquier proceso o trafico logístico dentro del aeropuerto. CAST es una herramienta modular, que se compone de diversas aplicaciones: Simulación de Terminal(*CAST Terminal*), Simulación de Handling (*CAST Vehicle*) y Simulación del trafico de Aeronaves (*CAST Aircraft*). El software CAST es utilizado en la actualidad por numerosos aeropuertos y entidades aeronáuticas en el mundo como *Fraport*, *BAA*, *Eurocontrol* o el Aeropuerto de Múnich.

En este proyecto en particular y dada la necesidad de simular el movimiento de aeronaves en la zona aire del Aeropuerto de Barcelona- El Prat, se ha optado por utilizar el modulo CAST Aircraft.

CAST Aircraft es capaz de simular el trafico aéreo existente dentro y alrededor de un aeropuerto considerando su infraestructura, reglas, restricciones y diferentes estrategias operacionales. De esta manera, permite evaluar nuevos conceptos y estrategias con diferentes niveles de detalle. CAST ayuda a identificar puntos críticos dentro del aeropuerto, planificación de recursos, evaluación de capacidades etc. Además una vez desarrollado el modelo, el software nos permite registrar diferentes indicadores de rendimiento valiosos para obtener análisis acerca de los resultados de la simulación.

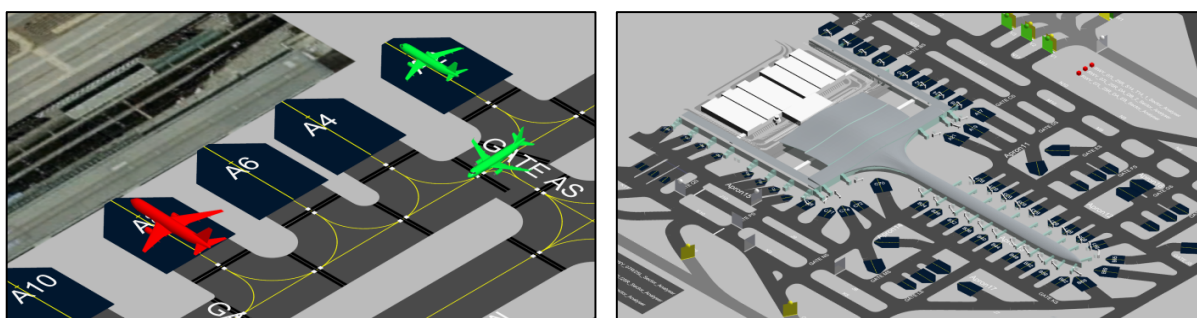


Fig.3.4.1 Imágenes extraídas del modelo del aeropuerto de Barcelona realizado con CAST Aircraft. (**Fuente:** Elaboración propia)

A modo de resumen, el potencial de CAST Aircraft se define en los siguientes puntos:

- Dispone de una red de módulos predefinidos, que facilitan el modelado de las pistas y las calles de rodaje.
 - Permite importar una configuración de pistas y calles de rodajes desde un archivo CAD.
 - Permite la generación de vuelos basándose en un programa de vuelos establecido.
 - Asignación dinámica de puertas de embarque y rutas de las aeronaves.
 - Permite establecer restricciones y normativas.
 - Permite introducir distribuciones estocásticas.
 - La interacción continua entre los agentes permite evitar situaciones conflictivas.
 - La herramienta “Log Analyser” permite calcular de manera precisa los retrasos, tiempos de rodaje y otros parámetros.
-

3.5. DESARROLLO DEL MODELO DIGITAL

3.5.1 Etapa de modelado (Obtención información, uso herramienta, problemáticas, proceso de validación, duración)

3.5.1.1 Obtención y gestión de la información del proyecto

Como ya se ha comentado en apartados anteriores, el proceso de obtención y gestión de la información necesaria para el desarrollo del proyecto es de vital importancia a la hora de construir un modelo valido que imite el comportamiento del sistema que se va a ser modelado. El objetivo de esta etapa por lo tanto es reunir toda la información utilizada para parametrizar los datos de entrada del modelo, así como evaluar el rendimiento de la simulación.

Debido a las peculiaridades y la naturaleza que este tipo de infraestructura la cantidad de información y datos a analizar es extremadamente alta. Es por esto que, para realizar una configuración básica del modelo de Barcelona se requiere como mínimo de los siguientes datos de entrada:

- Diseño y planos del lado aire de la infraestructura (pistas, calles de rodaje, puestos de estacionamiento etc.)
- Programación de vuelos que incluya la asignación de puestos de estacionamiento
- Configuración operativa del aeropuerto. (*Airport Information Publications*)

Posteriormente, con el objetivo de aumentar el refinamiento del modelo, otros datos adicionales son requeridos:

1. Diseño de la infraestructura aeroportuaria. Datos CAD.

Se requiere un fichero en formato DXF (Fichero de diseño por ordenador) que contenga la siguiente información:

- Diseño de pistas
- Calles de rodajes
- Diseño de la plataforma
- Puestos de estacionamiento con su respectiva nomenclatura.

2. Programación de vuelos

Se requiere un fichero en formato CSV (Excel separado por comas) que contenga la siguiente información:

- Cada fila del fichero representa un movimiento (llegada, salida o proceso de remolque).
- A su vez, cada movimiento debe disponer del numero de vuelo, aerolínea, la matrícula de la aeronave, el tipo de aeronave, tiempos de vuelo

(*ETA/ETD*¹⁴) incluyendo fecha, dirección del vuelo (*Arrivals/Departures*), puesto de estacionamiento. En este caso se han definido también, dos nuevos atributos que contienen, por un lado la información del número de terminal (Terminal 1/Terminal 2) y por otro el tipo de operación que realizan (Normal/Heavy).

3. Configuración de parámetros del lado aire

- Restricciones de paso en las calles de rodaje
- Límites de velocidad en las calles de rodaje
- Puntos de espera y cruces
- Prioridad de paso ante un conflicto
- Uso de calles de salida de pista y tiempo de ocupación de pista

4. Operaciones de retroceso y comportamiento de las aeronaves en plataforma

- Ubicaciones de los puestos de retroceso.
- Restricciones de uso para cada una de las posiciones de retroceso
- Duración de la operación de retroceso y tiempo de desacople.
- Duración de la operación de entrada de una aeronave en puestos de estacionamiento.

5. Pistas, aproximación y salidas

- Reglas para el uso de las pistas y comportamiento de las aeronaves en esta.
- Separaciones entre aeronaves (estela turbulenta, separación en radar)
- Separaciones en salidas (separaciones SID¹⁵)

6. Reglas y restricciones operativas del aeropuerto de Barcelona

- Datos específicos del comportamiento del aeropuerto (retrasos, cuellos de botella etc.)
- Configuración de proceso de rodaje.
- Datos relacionados con la observación de la operativa real del aeropuerto.

7. Estudios e investigaciones existentes en relación al aeropuerto de Barcelona.

Aunque la información no sea actual, puede incluir información útil. Algunos ejemplos serían:

- Estudio de la velocidad de rodaje.
- Estudios de capacidad de pista.
- Medidas tomadas para aumentar la capacidad.
- Etc.

¹⁴ **ETA/ETD:** Se puede definir **ETA** (*Estimated Time of Arrival*) como la medida que define la hora a que se espera que un barco, avión, carga etc. llegue a un lugar determinado. Por el contrario, se define **ETD** (*Estimated Time of Departure*) como la hora estimada de partida.

¹⁵ **SID:** Salida Instrumental Normalizada (del inglés *Standard Instrument Departure*, SID), también conocida como Procedimientos de Salida. Las SID son las rutas que seguidas por los aviones que siguen un plan de vuelo IFR después de despegar.

8. Opinión y conocimientos de expertos

Esta información resulta de gran utilidad durante la realización del proyecto ya que permite discutir los casos supuestos o validar los datos recolectados. En estos casos es de gran utilidad disponer de una reunión con expertos en el Aeropuerto de Barcelona.

En este caso la información definida en los párrafos anteriores se ha obtenido principalmente a través de dos fuentes. En primer lugar, la información relacionada con la programación de vuelos ha sido proporcionada directamente por el Departamento de Gestión del Aeropuerto de Barcelona. En segundo lugar, toda la información en relación a la operativa, diseño de la infraestructura, restricciones etc. ha sido obtenida a través de las herramientas públicas de información aeroportuarias de AENA (*Airport Information Publications*).

3.5.2 Proceso de modelado del sistema

En el siguiente apartado se presenta una aproximación al desarrollo del proceso de modelado del aeropuerto de Barcelona- El Prat siguiendo una secuencia cronológica. Se pueden encontrar también descripciones de los diferentes aspectos y puntos potenciales que ofrece el software de simulación CAST Aircraft.

1. Creación del modelo de la infraestructura. Importar modelo de red desde un archivo DXF

El primer paso en la etapa de modelado, consiste en crear un archivo del tipo DXF (utilizando herramientas de CAD) que contenga toda la información en referencia a la infraestructura del aeropuerto de Barcelona. Como se ha comentado en el apartado anterior, se utilizara la información publicada en la las publicaciones aeroportuarias de AENA (AIP).

Tal y como se muestra en la figura 3.5.2.1 se han definido los diferentes elementos estructurales en diferentes capas y colores. Magenta para la pista, amarillo para las calles de rodajes, verde para el espacio aéreo y por último se han definido los puestos de estacionamiento con un polígono cerrado rojo.

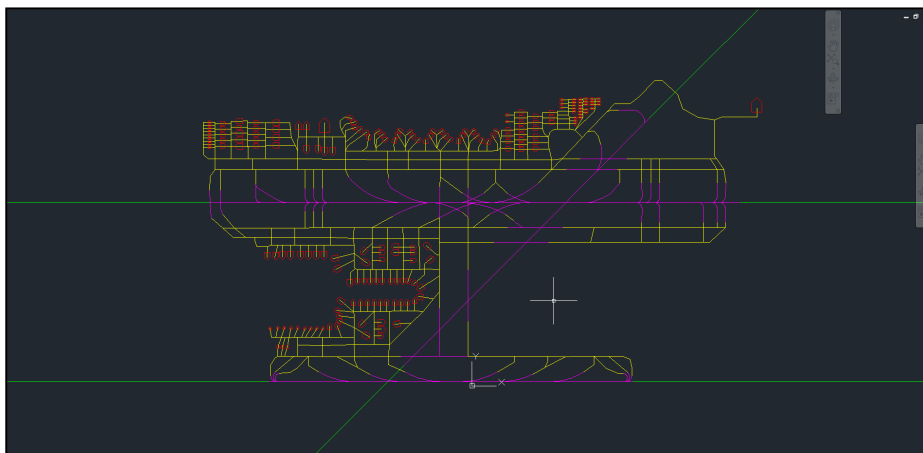


Figura 3.5.2.1 Archivo DXF inicial resultante del modelo del aeropuerto de Barcelona (*Fuente: Creación propia*)

El archivo DXF resultante es importado a CAST asignando cada uno de los niveles a su respectivo elemento estructural. Con esta información CAST será capaz de generar automáticamente la estructura básica del aeropuerto, tal y como se puede observar en la figura 3.5.2.2.

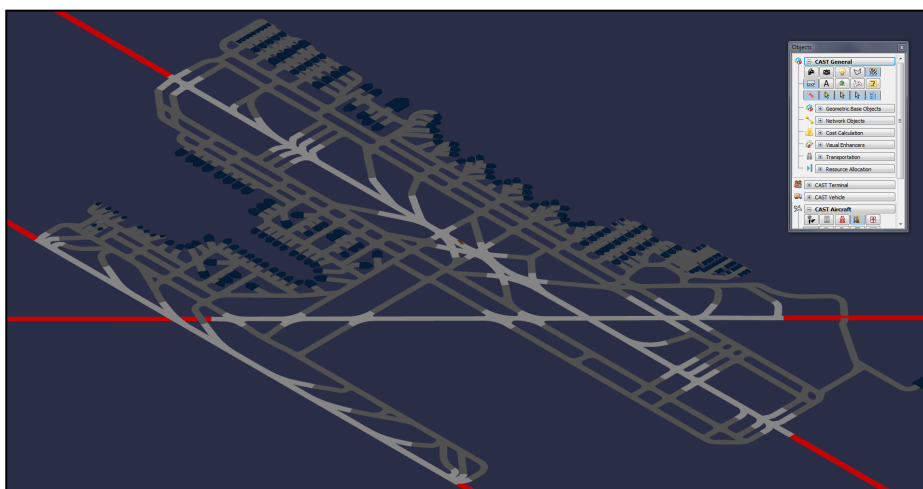


Figura 3.5.2.2 Resultado después de importar el fichero DXF. (*Fuente: Creación propia*)

2. Reajuste del diseño de la red del aeropuerto

Aunque el diseño del aeropuerto de Barcelona importado del archivo DXF proporcione una buena fase para definir la infraestructura aeronáutica del modelo, esta requiere de un proceso de ajuste, arreglo y re- definición. En la figura 3.5.2.3 podemos observar el resultado del archivo importando antes de proceder con los ajustes.

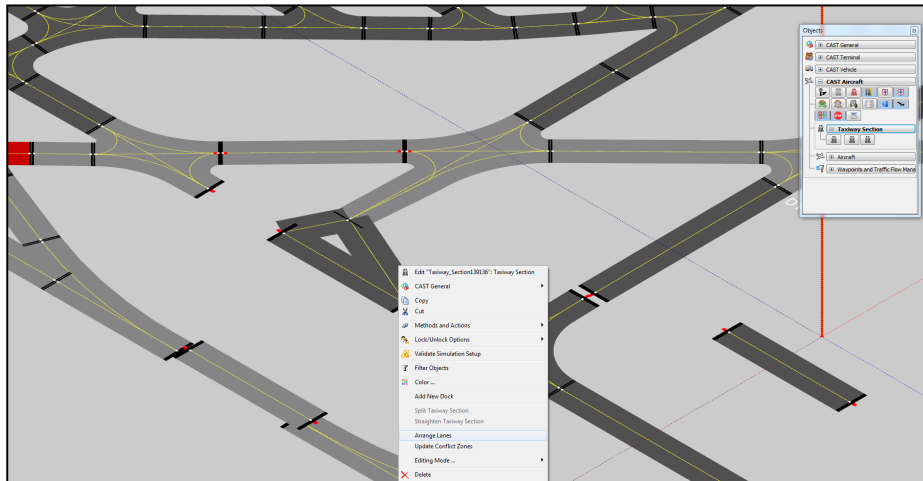


Figura 3.5.2.3. Diseño de red del aeropuerto antes del proceso de ajuste. (*Fuente: Creación propia. Modelo CAST BCN- El Prat*)

Este hecho es necesario, dado que algunos elementos de la infraestructura pueden no encontrarse conectados automáticamente entre ellos (calles de rodaje, pistas, puntos de espera etc.) o bien es necesario eliminar algunos de estos elementos con el propósito de ajustar los cruces o los puntos de estacionamiento. Una regla de diseño importante en el modelado de infraestructura es mantener cada uno de los elementos individuales tan simples como sea posible, eliminando trazados redundantes.

Como solución a este problema, el software CAST Aircraft ofrece una herramienta de ajuste automático de los elementos de la infraestructura, facilitando el proceso de ajuste.

3. Definición de las zonas de conflicto entre aeronaves

El software CAST Aircraft emplea la herramienta “*conflict zones*” (zonas de conflicto) con el fin de detectar posibles conflictos potenciales entre las aeronaves en cruces o calles de rodadura. Estas zonas de conflicto, son necesarias para evitar que las aeronaves que se aproximan a los cruces de pistas o calles de rodaje puedan colisionar entre sí, estableciendo una preferencia de paso. Esta preferencia de paso se establece mediante la lógica “*First arrived first served*”, es decir, tendrá prioridad de paso aquella aeronave que primero llegue al punto de conflicto, bloqueando el paso de la segunda.

La definición, creación y actualización de las zonas de conflicto es generada de manera automatizada por CAST Aircraft de acuerdo con el diseño de red del aeropuerto definido previamente. A su vez, también será necesario realizar un ajuste de esta generación automatizada.

La figura 3.5.2.4 muestra las zonas de conflicto generadas en el punto de cruce localizado entre la puerta JS y la calle de rodaje E3 dentro del aeropuerto de Barcelona – El Prat. En este caso, el avión que se encuentra en espera permanecerá en el punto de espera hasta que la zona de conflicto se encuentre libre del tráfico precedente anterior.

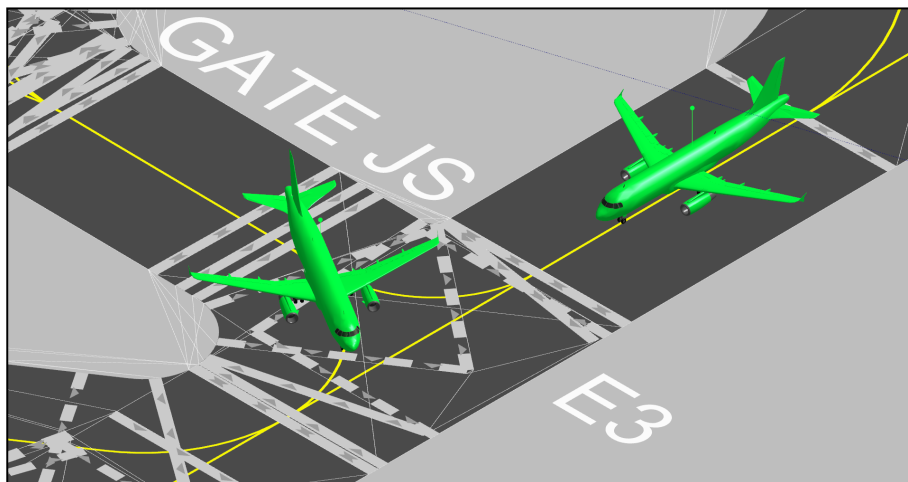


Figura 3.5.2.4 Aeronave en espera antes de entrar en una zona de conflicto. (**Fuente:** Creación propia. Modelo CAST BCN- El Prat)

4. Gestión de red aeroportuaria. Gestión de uso de Pistas.

Tal y como nos muestra la figura 3.5.2.5, en CAST Aircraft, una pista se compone de diferentes objetos (*flow management waypoints*) que trabajan de manera conjunta gestionando el flujo de aeronaves.

- La pista y las calles de salida se encuentran definidos por el área (rectángulo azul) que genera la zona de pistas conectada.
- El punto de espera de salidas (verde) tiene que conducir a la pista permitiendo vuelos de salida (dirección de pista). A su vez, tiene que existir un punto de fin de pista (rojo).
- Los vuelos entrantes requieren la existencia de un umbral (azul) que defina la cabecera de la pista y las calles de salida disponibles (amarillo).

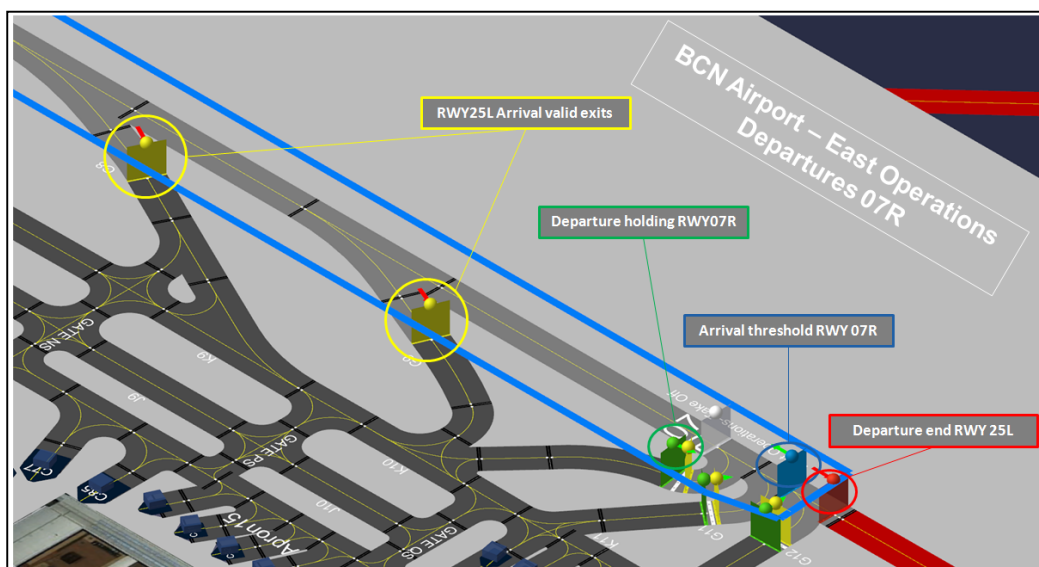


Figura 3.5.2.5 Vista general de la pista 07R. (**Fuente:** Creación propia. Modelo CAST BCN- El Prat)

En CAST Aircraft, con el fin de detectar si una pista se encuentra actualmente ocupada, es posible definir un “*Sector Analyzer*”, un analizador de sector, que comprenda la superficie total de la pista. (Rectángulo azul en la figura 3.5.2.5).

Además, una vez definido, nos permite calcular la distancia entre un punto determinado (habitualmente el umbral de la pista a estudiar) y el primer avión en fase de aproximación. Es necesario calcular a la vez que el tiempo de separación entre el avión actual en espera con la aeronave precedente (con el objetivo de evitar las estelas turbulentas de la aeronave predecesora¹⁶).

Estos datos son necesarios para determinar la secuencia de despegues y aterrizajes (consiguiendo un sistema AMAN/DMAN¹⁷) para cada pista teniendo en cuenta las restricciones operativas definidas por el aeropuerto. Por lo tanto, dentro del modelo, una aeronave en espera únicamente podrá despegar cuando se cumplan las siguientes restricciones:

- La superficie completa del “*Sector Analyzer*” se encuentra vacía, es decir no hay ninguna aeronaves bloqueando la pista ni haciendo uso de ella.
- La distancia respecto a la primera aeronave en aproximación es superior a la distancia mínima requerida.
- La distancia en tiempo de la aeronave en espera respecto a la aeronave predecesora, es superior a la mínima requerida.

A su vez, tal y como se muestra en la figura 3.5.2.6 es posible restringir el uso de los puntos de espera para despegue, a un determinado tipo de aeronave. Esta herramienta puede ser útil (tal y como se especifica en apartados posteriores) para comprobar y determinar la mejor y más eficiente configuración de salidas.

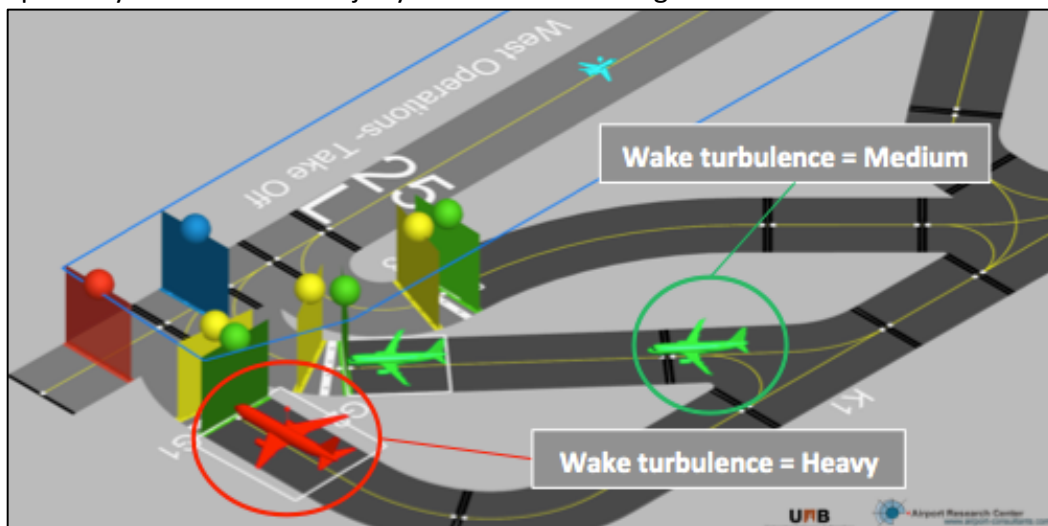


Fig. 3.5.2.6 Pista 25L. Posiciones de espera para aeronave en fase de despegue. (Fuente: Creación propia. Modelo CAST BCN- El Prat)

¹⁶ **Estela turbulenta (*Wake turbulence*):** es la turbulencia que se forma detrás de un avión a medida que este pasa a través del aire. (Fuente: Royal Aeronautical Society – Wake turbulence)

¹⁷ **AMAN/DMAN:** Arrivals Management/Departures Management.

En relación a las aeronaves que se realizan el proceso de aterrizaje, es necesario especificar las calles de salida de pista que se encuentran disponibles, conectando el umbral de la pista con cada una de las salidas. Una vez se encuentran definidos los puntos de salida, CAST permite personalizar o restringir el uso de cada una de estas salidas a un tipo de aeronave específico (*Exit Usage Distribution*).

Por ejemplo, en el caso del modelo de Barcelona, y siguiendo las restricciones operativas del aeropuerto en relación al uso de las salidas rápidas de pista, se ha definido la distribución en relación a la categoría de la estela turbulenta de la aeronave. Es posible además establecer, el tiempo de ocupación de pista (*Runway Occupancy Time (ROT)*), para cada una de las salidas definidas.

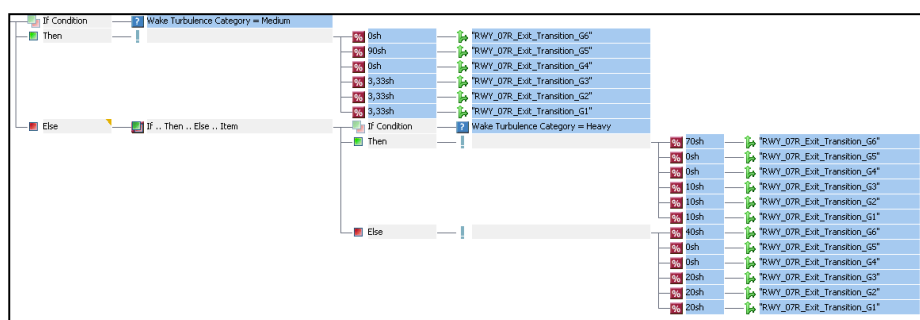


Figura 3.5.2.7 La figura muestra las restricciones establecidas para cada una de las salidas de pista definidas. (*Fuente: Creación propia. Modelo CAST BCN- El Prat*)

5. Definición y creación de los puesto de retroceso de aeronaves (*Pushback Locations*)

El siguiente paso consiste en definir los puestos de retroceso de aeronaves, en adelante PBL (*Pushback Location*). Este hecho evita que las aeronaves abandonen los puestos de estacionamiento incumpliendo las restricciones operativas y sin control alguno. Un PBL define la ubicación desde la que una aeronaves debe ser remolcada hacia la pista, así como la posición final que debe adoptar la aeronave. En este caso además, un único PBL puede servir a múltiples aeronaves, representado un recurso compartido.

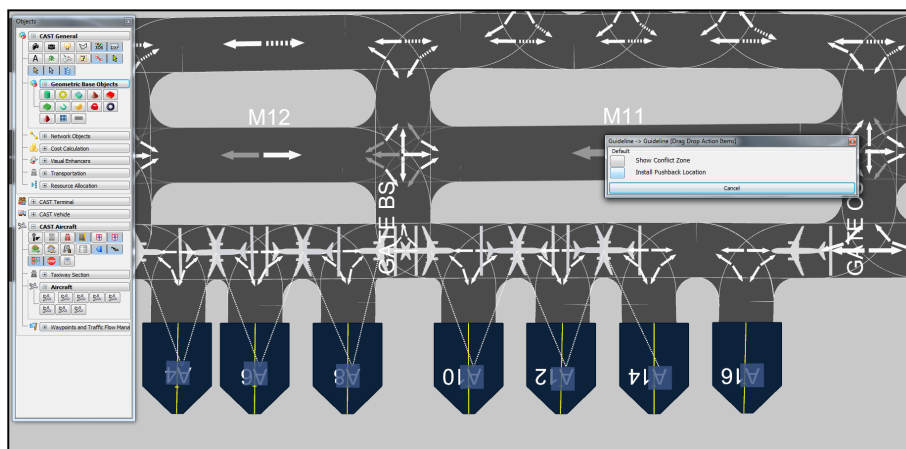


Fig. 3.5.2.8 Puestos de retroceso de aeronaves en el dique sur de la Terminal 1. (*Fuente: Creación propia. Modelo CAST BCN- El Prat*)

Aparte de la ubicación, CAST nos permite definir un conjunto de restricciones para cada una de las ubicaciones, permitiendo gestionar los siguientes aspectos:

- Tipos de aeronaves que pueden utilizar cada uno de los puestos de estacionamiento.
- El tiempo que la aeronave permanecerá en espera una vez finalizado el proceso de retroceso (encendido de motores, liberación del tractor etc.). Este tiempo puede ser definido como constante o bien siguiendo una distribución estadística.
- Uso compartido de un mismo recurso. Permite representar la escasez de tractores de retroceso en un momento determinado.
- Evita la colisión entre dos aeronaves al realizar el proceso de retroceso.

6. Definición de propiedades y restricciones operacionales

Con el fin de definir las restricciones operativas del aeropuerto (dirección de las pistas de rodaje, restricciones de las aeronaves en rodajes etc.) es necesario definir para cada una de las calles de rodaje, un conjunto de propiedades que limitan el paso a un grupo específico de aeronaves.

En el caso en particular del aeropuerto de Barcelona, se ha optado por definir una propiedad que permita establecer y definir la dirección operativa actual del aeropuerto (configuración este u oeste) tal y como se muestra en la figura 3.5.2.9.

La introducción de esta propiedad, actúa a modo de restricción ayudando a definir la dirección de cada una de las calles de rodajes dependiendo de las diferentes configuraciones operativas.

A modo de ejemplo tal y como se puede observar en la figura 3.5.2.9 y de acuerdo con las restricciones operativas del aeropuerto, la dirección de la calle de rodaje “N” es bidireccional para configuraciones de operación oeste, y dirección única este para configuraciones diferentes a la habitual. Por lo tanto esta restricción impide el paso de aeronaves en proceso de rodaje en dirección Oeste si la dirección operativa actual es hacia el este.

Es posible también definir unos costes más elevados a los puestos de estacionamiento remoto de vuelo, haciendo que se de prioridad al uso de puestos en pasarela, pero que en caso de que todos los puestos se encuentren ocupados dar la posibilidad de que se asignen los vuelos a estos vuelos. Por último es posible también denegar el uso de un puesto de estacionamiento concreto a un tipo de aeronave.

8. Resultado final de la etapa de modelado

Finalmente una vez completadas todas y cada una de las etapas descritas anteriormente, se obtiene como resultado el modelo que se presenta en la siguiente figura (fig.3.5.2.11). Este modelo se encuentra todavía, en este punto, pendiente de validación y verificación.

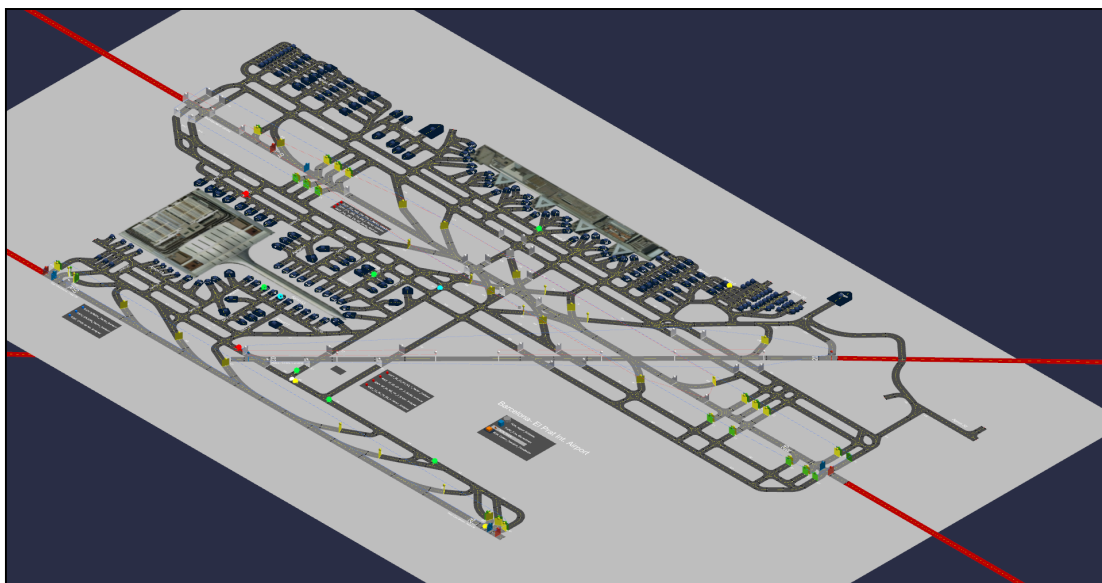


Fig. 3.5.2.11 Vista general del modelo del Aeropuerto de Barcelona en configuración operativa oeste. *(Fuente: Creación propia. Modelo CAST BCN- El Prat)*

3.5.2 Etapa de verificación y validación del modelo

Tal y como se ha definido en apartados anteriores, por verificación entendemos, el proceso que consiste en comprobar que el modelo simulado cumple con los diferentes requisitos de diseño para los que se elaboró y se construyó. Se trata de evaluar, por lo tanto, que el modelo se comporta de acuerdo a su diseño inicial. En definitiva, la etapa de verificación nos debe permitir contestar a la pregunta: ¿Se ha construido correctamente el modelo?

En este caso, el modelo debe comportarse de acuerdo a los datos reflejados en la información AIP (*Airport Information Publications*) del Aeropuerto de Barcelona, dado que han sido estos datos los utilizados a la hora de construir el diseño inicial. Es por esto, que se han llevado a cabo comparaciones entre los datos oficiales publicados y el comportamiento de las aeronaves en el modelo digital (análisis de trayectorias, análisis de restricciones operativas, sentido de rodaje de las aeronaves etc.)

Una vez verificado que el modelo ha sido construido de manera correcta, se debe determinar si el modelo construido es el correcto. A través de la etapa de validación se valoran las diferencias en el funcionamiento del modelo y el de el sistema real que se esta tratando de simular. Este hecho, consiste principalmente en determinar que tanto las teorías y las hipótesis de trabajo, como las suposiciones bajo las que se ha formalizado el modelo y la simulación son correctas.

Existen diversas manera de validar un modelo. A continuación se presentan las mas comunes:

- Consultar la opinión de expertos en relación a los resultados obtenidos.
- Contrastar los datos obtenidos en las simulaciones previas con los datos históricos existentes.
- Comprobar posibles fallos del modelo al simular datos o situaciones que hacen fallar al sistema real.
- La aceptación y confianza en el modelo por parte de la persona o ente que hará uso de los resultados obtenidos a través del modelo.
- Calculando la exactitud con la que el modelo es capaz de predecir situaciones futuras.

Dada la dificultad de obtener datos históricos que dificultan a su vez el calculo de la exactitud de predecir situaciones futuras, se opta por validar el modelo consultado la opinión de expertos del aeropuerto de Barcelona. Por consiguiente, han mantenido reuniones con diferentes responsables del Aeropuerto de Barcelona y AENA (departamento de gestión operativa, departamento de handling, centro de Gestión aeroportuaria) con el objetivo de detectar errores en el modelo realizado. Estas reuniones han permitido responder a la siguiente pregunta: ¿Un experto diferenciaría los resultados de la simulación del sistema real?

En relación a esta pregunta los expertos del Aeropuerto de Barcelona, responden que no se presentan a nivel general diferencias significativas entre el sistema real y el modelo realizado. Si bien, se realizan pequeñas modificaciones, relacionadas con la operativa de las aeronaves, motivadas a raíz de diversos comentarios de los expertos.

A su vez, también se ha optado por introducir situaciones que afectan a la operativa del sistema real dentro del modelo simulado con el objetivo de comprobar nuevamente, que no existen diferencias de peso entre ambos sistemas.

3.5.3 Etapa de simulación - Solución de problemas operacionales en el aeropuerto de Barcelona.

La simulación del modelo se realiza después de que este haya sido verificado y validado. La etapa de simulación, consiste en generar los datos deseados y realizar los análisis necesarios que nos permitan extraer conclusiones en relación al modelo.

En el caso concreto del modelo del Aeropuerto de Barcelona, se ha optado por definir diferentes escenarios en la simulación, que dan respuesta a los problemas operativos del aeropuerto detectados en las simulaciones preliminares. A continuación por lo tanto, se introducen, definen y se da solución a los siguientes problemas operativos:

- ▶ **Problema 1:** *Las aeronaves que se encuentran realizando operaciones de retroceso desde los puestos de estacionamiento 246 y 248 de la Terminal 1 ocasionan el bloqueo de las calles de rodaje E3 y J7 durante las horas pico, generando colas de espera.*

- **Introducción al problema y situación inicial:**

Tal y como se puede observar en la siguiente figura (fig.3.5.3.1), el singular diseño que presenta la Terminal 1 del aeropuerto de Barcelona – El Prat en forma de dique o espada, si bien es un diseño idóneo para concentrar un gran número de puertas de embarque, también puede generar diversos problemas operativos como el que se presenta a continuación.

En este caso particular, la proximidad de los puestos de estacionamiento 246 y 248 (*resaltados en color rojo*) juntamente con el recorrido que deben realizar las aeronaves durante su fase de retroceso (*marcados en verde*) hacen que durante el transcurso de esta fase queden bloqueadas las calles de rodaje E3 y J7 (*en amarillo*).

Cabe destacar el hecho de que las calles de rodaje E3 y J7 sufren de un flujo elevado de vehículos dado que son las vías de acceso principales por las que deben transitar todas las aeronaves que provienen de la Terminal 2 y gran parte de las aeronaves del dique norte y central de la Terminal 1 en dirección a la pista 25L/07R (configuración de despegue oeste).

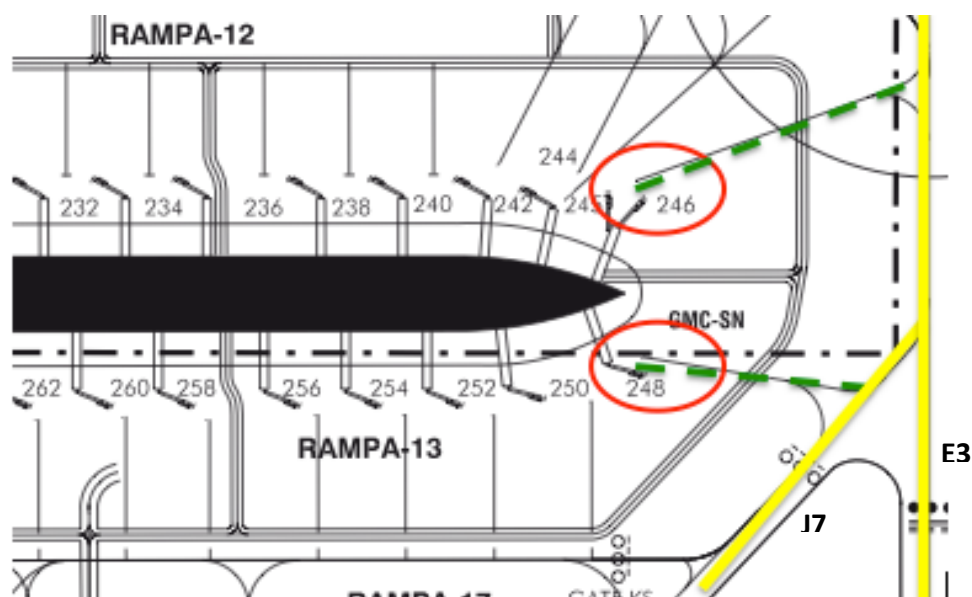


Fig. 3.5.3.1 Vista alzada de la localización de los puestos de estacionamiento de la Terminal 1 en relación a las calles de rodaje y puestos de retroceso. *(Fuente: AENA. Información AIP LEBL)*

Este hecho genera colas de espera a aquellas aeronaves que se encuentren en rodaje hacia la pista activa en ese momento. Es importante, tener en cuenta que a partir de los datos obtenidos en las simulaciones realizadas anteriormente, el tiempo medio de retroceso para el tipo de aeronave que ocupa estos puestos de estacionamiento, es de aproximadamente 3 minutos.

El gráfico mostrado a continuación (*Gráfico 3.5.3.2*), ha sido extraído de los datos obtenidos en modelo CAST realizado. En este se muestran los tiempos máximos de espera para cada aeronave en la intersección entre la GATE JS y la calle de rodaje E3 (Punto de inicio de la zona conflictiva).

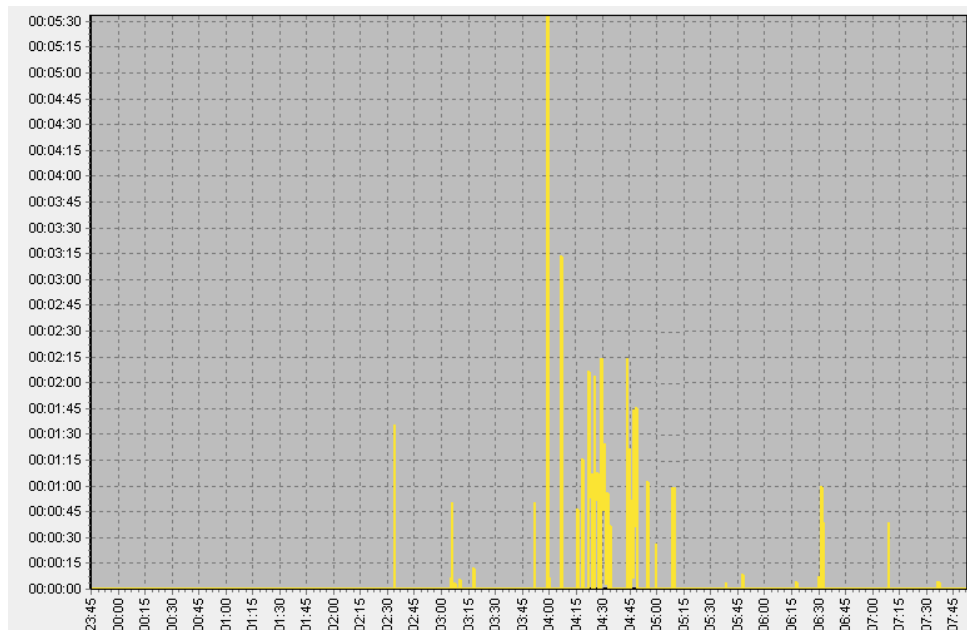


Gráfico 3.5.3.2. Tiempo máximo de espera por aeronave en el punto de espera definido entre las calles de rodaje E7 y J7. *(Fuente: Elaboración propia - Log Analyser CAST Aircraft).*

Como podemos observar, el gráfico muestra un tránsito más o menos fluido de aeronaves durante la mayor parte del periodo analizado (con una media de tiempo de retraso de *01:05:16 minutos*), a excepción de ciertos momentos en los que aparecen picos en los tiempos de espera o cola alcanzando máximos de hasta *05:32:44 minutos* en este punto. Si comparamos estos picos con la programación de vuelos podremos observar como estos picos son respuesta al bloqueo de las calles de rodaje E3 o J7 por parte de una aeronave en fase de retroceso.

- **Objetivos en relación al problema planteado:**
 - Reducir los tiempos de espera de las aeronaves en la intersección entre JS y E3.
 - Minimizar los retrasos producido por el bloqueo de las calles de rodaje E3 y J7.
 - Mejorar el flujo de aeronaves a través de la zona conflictiva definida.
- **Soluciones preliminares del problema:**
 - Redefinir el recorrido establecido que deben realizar las aeronaves desde su puesto de estacionamiento hasta los puntos de espera de despegue. De esta manera se pretende evitar o minimizar el número de aeronaves que transitan a través de esta zona conflictiva.
 - Introducir un punto de espera de aeronaves situado en la intersección de las calles de rodaje JS y E3 (inicio y fin de la zona

conflictiva). De esta manera se pretende regular el tráfico por las calles de rodaje E3 y E7 siempre que existan aeronaves realizando la operación de retroceso en los puestos de estacionamiento 246 y 248.

- Restringir el uso de los puestos de estacionamiento 246 y 248 exclusivamente a los periodos valle de la operativa diaria.
- Restringir de manera completa el uso de estos puestos de estacionamiento forzando a las aeronaves a utilizar los puestos de estacionamiento cercanos 242, 245 y 250 o puestos de estacionamiento remoto.

- **Solución a implementar:**

En este caso se ha optado por tomar como decisión definitiva aquella que se presupone tendrá un menor efecto en la operativa actual del aeropuerto. Por consiguiente, la solución a este problema pasa por la creación e introducción en la operativa de un nuevo punto de espera que regule el tráfico de aeronaves dentro de la zona conflictiva.

Si bien las diversas soluciones alternativas propuestas podrían dar solución al problema definido, existen diferentes aspectos que dificultan o complican su aplicabilidad:

- Redefinir el recorrido de rodaje de las aeronaves supone un gran impacto en la operativa del aeropuerto, por lo que serían necesarios realizar estudios de costes, retrasos y flujo de las diferentes opciones analizadas. Además el diseño actual de las calles de rodaje en el aeropuerto de Barcelona hace que las alternativas de rodaje sean limitadas.
- A su vez restringir de manera parcial o total la utilización de ciertos puestos de estacionamiento supondría una disminución de capacidad de estacionamiento con el consiguiente aumento de ocupación de los puestos restantes. Este hecho puede provocar que en ciertos momentos de actividad pico sea necesario el uso de puestos de estacionamiento remoto para poder dar servicio a la demanda.

- **Implementación de la solución en el modelo:**

Tal y como se puede observar en las siguientes figuras, la implementación de la solución requiere en primer lugar de la introducción de un punto de espera en la intersección previa a la zona del conflicto. De esta manera se consigue que, en aquellos casos en que existe una aeronave realizando el proceso de retroceso desde alguno de los puntos de estacionamiento conflictivos (246 y 248), se dará prioridad a esta aeronave, a la vez que se reasignaran rutas alternativas de paso a las demás aeronaves que se encuentren en proceso de rodaje.

Por consiguiente, se espera, en primer lugar, minimizar el retraso en la salida de la aeronave en fase de retroceso, y en segundo lugar evitar el bloqueo producido por esta primera aeronave mediante el la asignación de rutas alternativas.

A continuación, se muestran los pasos seguidos para obtener dicha solución:

1. Introducción de tres puntos de control de colas (*Queue Flow detector*) con el objetivo de obtener los datos necesarios que permitan realizar una evaluación inicial del problema a solucionar.
2. Creación de zonas de conflicto (*Conflict zones*) que incluyan la zona de retroceso de los puntos conflictivos. De esta manera se podrá controlar, si existe alguna aeronave obstaculizando la zona de conflicto. Posteriormente esta información será utilizada para definir restricciones de paso.

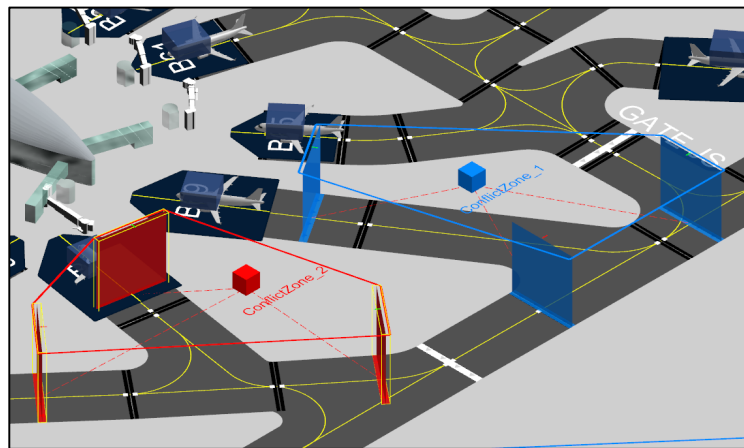


Fig. 3.5.3.3. Definición de las zonas de conflicto. (**Fuente:** Elaboración propia. Modelo CAST Aircraft – Aeropuerto de Barcelona).

3. Establecimiento de puntos de espera (*Waypoints*). En estos puntos de espera se definirá, dependiendo de si alguna de las zona conflictivas se encuentra ocupada (una aeronave se encuentra en fase de retroceso) una ruta alternativa para las aeronaves en rodaje. De esta manera se evitara rodar por la zona bloqueada y por lo tanto se evitaran los retrasos debidos a este aspecto.

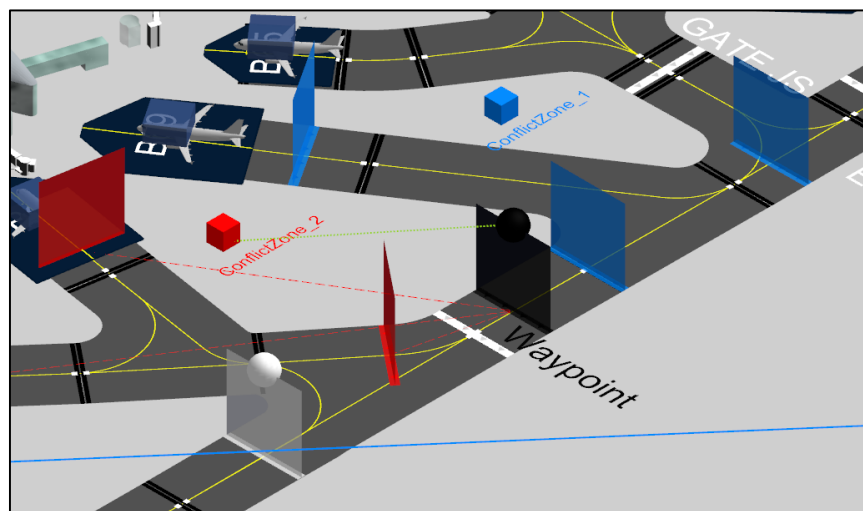


Fig. 3.5.3.4. Definición de los puntos de espera y unión de estos con las zonas de conflicto previamente definidas. (**Fuente:** Elaboración propia. Modelo CAST Aircraft – Aeropuerto de Barcelona).

4. Para poder definir cambios en la trayectoria de las aeronaves a tiempo real, es necesario utilizar la herramienta de CAST Aircraft “Command”. Esta herramienta permite definir las condiciones que las aeronaves deben cumplir al pasar por un punto concreto (en este caso los puntos de espera definidos).

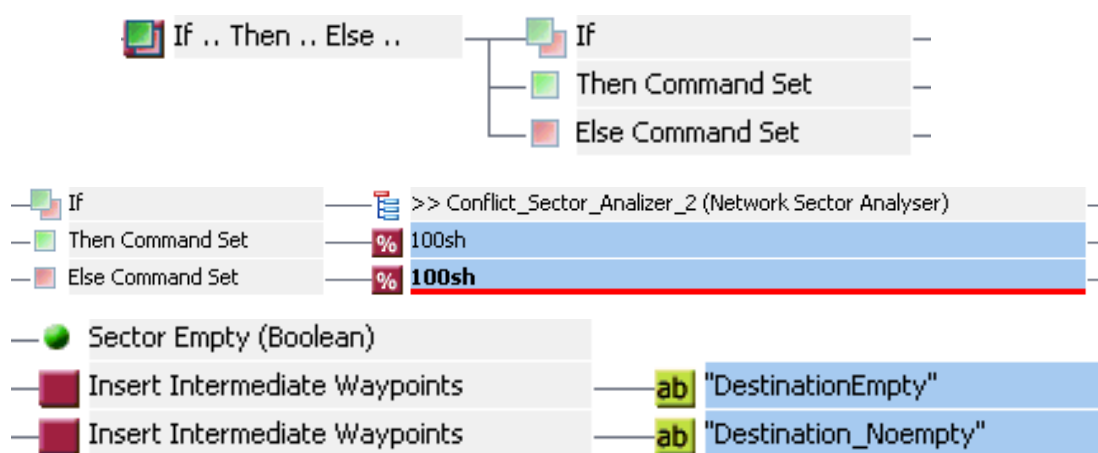


Fig. 3.5.3.5. Lógica If...Else que permite definir la trayectoria de las aeronaves al pasar por los puntos de espera definidos. (**Fuente:** Elaboración propia. Modelo CAST Aircraft – Aeropuerto de Barcelona).

De la siguiente manera, tal y como se puede observar en la figura 3.5.3.5 mediante el establecimiento de una sencilla lógica “If...Else” se puede definir el siguiente punto de paso, forzando a la aeronave a cambiar la ruta que tenía establecida inicialmente. En este caso, si las zonas de conflicto se encuentran vacías se procede a dirigir a la aeronave por la trayectoria de rodaje estándar del aeropuerto (a través de la calle de rodaje J7). Si por el contrario, alguna de ellas se

encuentra ocupada se procede a dirigir la aeronave a través del punto de la calle de rodaje E2 (cruzando la pista 02/20).

- **Resultados obtenidos y conclusiones:**

Una vez implementadas las mejoras definidas en el apartado anterior se procede a ejecutar nuevamente la simulación con el objetivo de identificar el éxito de las medidas llevadas a cabo.

En este caso, el objetivo es realizar una comparativa de los grafica de retrasos (*grafica 3.5.3.2*) obtenida en la fase inicial del problema, con la misma gráfica obtenidas una vez realizadas las modificaciones definidas. A continuación se presenta la gráfica 3.5.3.6 en la que se pueden observar los resultados obtenidos después de aplicar las mejoras especificadas:

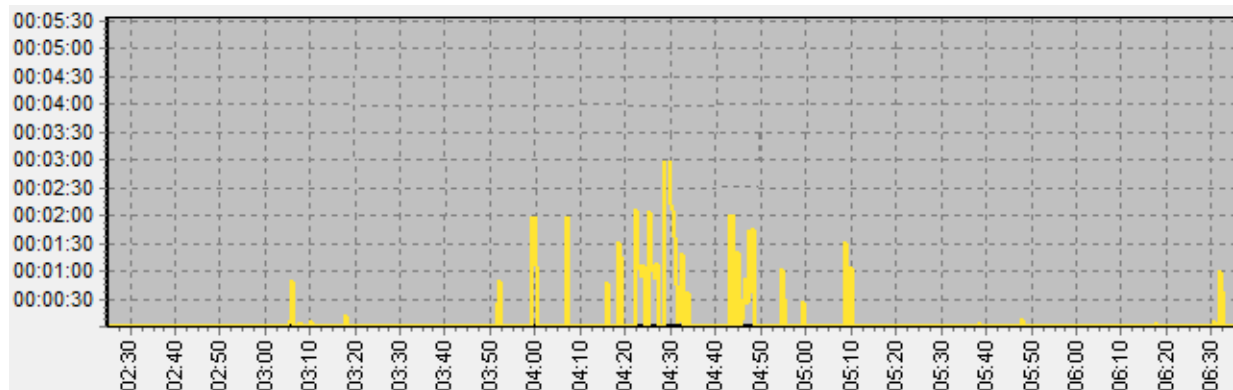


Gráfico 3.5.3.6. Tiempo máximo de espera por aeronave en el punto de espera una vez aplicadas las mejoras operativas en la zona conflictiva de las calles de rodaje E7 y J7. (**Fuente:** Elaboración propia - Log Analyser CAST Aircraft).

Si analizamos el gráfico se puede observar una reducción en los tiempos máximos de espera de las aeronaves en los puntos de espera de la zona conflictiva, con una reducción que pasa de 05:32:44 minutos en el primer gráfico a solamente 02:59:22 en el segundo. En relación al tiempo medio de retraso en este punto, ha pasado de 01:05:16 minutos a 00:42:43. Este hecho es debido a la implementación de la nueva solución operativa que permite modificar la ruta de rodaje de las aeronaves, en caso de que la zona conflictiva se encuentre ocupada, evitando de esta manera el cuello de botella o bloqueo generado.

Si bien, cabe destacar el hecho de que, sería necesario modificar el sentido de la calle de rodaje J7, que actualmente tiene configuración norte y que debería ser configurada a configuración bidireccional (Norte-Sur).

- **Problema 2:** Retrasos en la fase de despegue relacionados con aeronaves que debido a restricciones de “performance” y seguridad requieren utilizar la pista de mayor longitud 25R/07L . (Únicamente durante periodos operativos pico)

• **Introducción al problema y situación inicial:**

La configuración operativa utilizada por defecto en el aeropuerto de Barcelona (Configuración de pistas Oeste), define la pista **25R/07L** (con unas dimensiones de 3.552x60 metros) como aquella utilizada para los aterrizajes y la pista **25L/07R** (2660x45 metros) como la utilizada en las operativas de despegue.

Como consecuencia a esta configuración y teniendo en cuenta la diferencia existente entre la longitud de las dos pistas (alrededor de 900 metros de diferencia entre la 25R/07L y la 25L/07R) el aeropuerto se enfrenta a situaciones en las que un grupo reducido de aeronaves se ven forzadas a utilizar la pista 25R/07L (Pista activa para aterrizajes) para realizar las operaciones de despegue. Este hecho es debido a los factores de “performance” particulares de cada aeronave que requieren, por motivos de seguridad, una mayor longitud de pista.

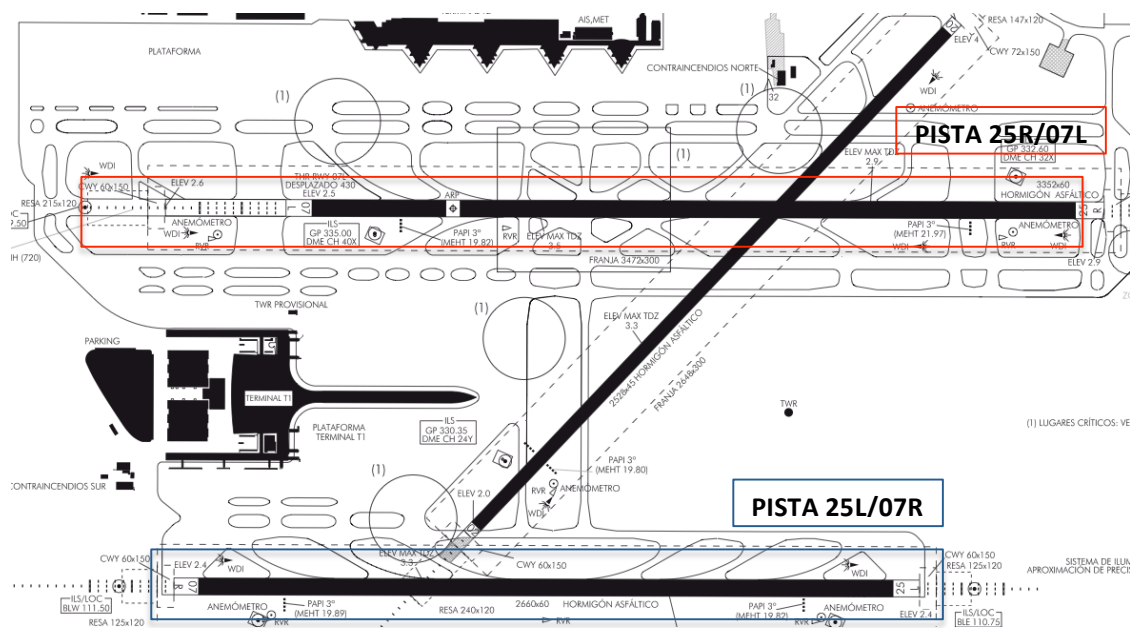


Fig. 3.5.3.2 Vista general del Aeropuerto de Barcelona- El Prat. Situación de pistas 25R/07L (rojo) y 25L/07R (azul). (Fuente: AENA. Información AIP LEBL)

Este hecho, genera una alteración en la operativa estandarizada del aeropuerto dado que genera alteraciones en la secuencia de aterrizajes programados en la pista 25R/07L (Durante los periodos de operativa pico). Estas alteraciones son producidas por la necesidad de introducir una operación despegue entre diversas operaciones de aterrizaje, lo que supone, por lo tanto, aumentar las distancias de seguridad entre las aeronaves perturbando la separación habitual.

Todo este conjunto de alteraciones, tienen como consecuencia directa retrasos en la operativa del aeropuerto, debiendo decidir entre dar prioridad a las aeronaves que se encuentran en fase de aterrizaje o por el contrario autorizar el despegue de la aeronave que se encuentra en espera.

- **Objetivos en relación al problema planteado:**

- Minimizar los retrasos en la operativa del aeropuerto de Barcelona generados por la utilización de la pista 25R/07L para operaciones de despegue y aterrizaje.
- Encontrar la solución que minimice estos retrasos y que a su vez respete las distancias de seguridad y las restricciones operativas impuestas.
- Realizar un estudio AMAN (*Arrival Management*) y DMAN (*Departure Management*) de la pista 25R/07L.

- **Soluciones preliminares del problema:**

- Dar prioridad a la aeronave que deben despegar por la pista 25R/07L encadenando una operación de despegue entre dos aterrizajes (aumentando la distancia de seguridad con la aeronave precedente).
- Restringir las operaciones de despegue de aeronaves que utilizan la pista 25R/07L exclusivamente para operativas en horas valle.
- Redefinir la secuencia de llegadas a la pista 25R teniendo en cuenta las necesidades de uso de esta pista para despegues.

- **Solución a implementar:**

Después de evaluar las diferentes soluciones alternativas definidas en el apartado anterior se ha optado por tomar como solución definitiva aquella que tiene como objetivo dar prioridad a las aeronaves que se encuentran en espera para despegue por la pista 25R/07L. Por consiguiente se ha optado por aumentar la distancia de seguridad entre la aeronave precedente y la precursora con el objetivo de crear una ventana de tiempo lo suficientemente amplia como para introducir una operación de despegue.

Por otro lado, si bien las diversas soluciones alternativas propuestas pueden dar solución al problema descrito ambas presentan ciertos inconvenientes que las han llevado a ser desestimadas.

- En primer lugar la imposibilidad de restringir la operativa de la pista 25R/07L viene dada por la necesidad de disponer en todo momento de las facilidades necesarias para proveer de un servicio completo independientemente del tipo de aeronaves o

de las “performances” particulares de esta. Ya que, restringir esta operativa supondría la imposibilidad de ofrecer ciertas rutas, frecuencias o capacidad.

- En segundo lugar dado que como ya hemos comentado en apartados anteriores, los retrasos son estocásticos y por lo tanto son en la mayoría de ocasiones debidos al azar. Este hecho dificulta el establecimiento de una secuencia determinada de despegues y aterrizajes, ya que cualquier programación establecida a priori, se encontraría lejos de la realidad.

- **Implementación de la solución en el modelo:**

En las siguientes figuras se puede observar los procesos implementados con el objetivo de dar solución al problema planteado. En primer lugar, la asignación de la pista 25R/07L para el despegue a aquellas aeronaves con necesidades de longitud de pista para despegue superior a 2460 metros (Longitud de la pista 25L/07R manteniendo un margen de seguridad de 200 m).

En segundo lugar, se presenta el proceso de asignación de prioridades de uso de pista, priorizando a aquellas aeronaves que se encuentran en los puntos de espera para despegue de la pista 25R/07L. A la vez, con el objetivo de minimizar los retrasos que pueden producirse como consecuencia de la utilización de la pista 25R/07L para operaciones simultaneas de despegue y aterrizaje, se pretende aumentar la distancia entre aeronaves en fase de aterrizaje. De esta manera se pretende intercalar una aeronave en fase de despegue entre dos aeronaves en fase de aterrizaje.

1. Asignación de la pista 25R/07L debido a restricciones de performance de las aeronaves.

- 1.1. Creación de un nuevo atributo “*Abnormal_Operations*” en la entidad “*Aircraft*” siendo esta de tipo Booleano y tomando valores True o False (True en caso de que la aeronave realice la operación anormal, utilizando la pista 25R/07L y False en caso de realizar la operativa estándar en la pista 25L/07R). En este caso será necesario modificar el *archivo xls* que contiene la información de los planes de vuelo, añadiendo este nuevo atributo y su nuevo valor.

El hecho de realizar la asignación de esta variable de forma manual radica en la imposibilidad de asignar este valor en relación a otras variables generales conocidas, como pueden ser el tipo de aeronave, o la compañía. Esto se debe al hecho

de que las performance de una aeronave son totalmente independientes a estos factores.

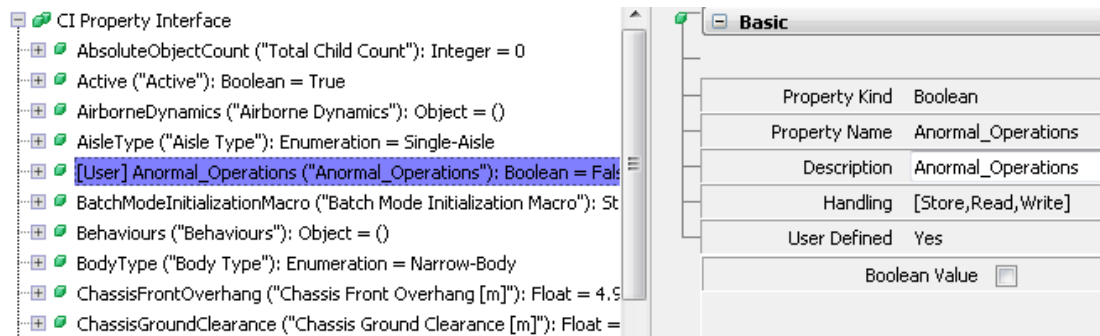


Fig.3.5.3.3. Definición de un nuevo atributo “*Anormal_Operations*” para la clase avión. (*Fuente: Creación propia. CAST Aircraft*)

- 1.2. Mediante la introducción de puntos de control (*Waypoints*) y siguiendo el método utilizado en el apartado anterior para la definición de la trayectoria de la aeronave en rodaje, se dirigirá a las aeronaves hacia la pista de despegue definida.
- 1.3. Nuevamente, mediante la introducción de un comando (Command tool) y una sencilla lógica If...Else, se definirá como pista de despegue la 25R/07L en caso de que el atributo “*Anormal_Operations*” tenga valor *True*, o la 25L/07R en caso de que el valor sea *False*.

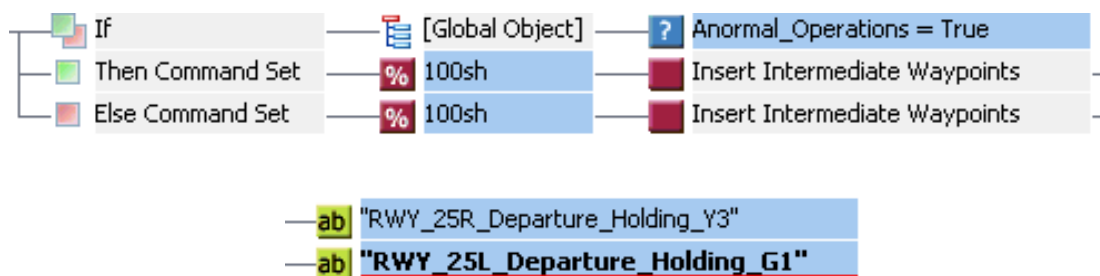


Fig. 3.5.3.4. Lógica *If...Else* que permite modificar la trayectoria de rodaje de las aeronaves. (*Fuente: Creación propia. CAST Aircraft*)

2. Establecimiento de prioridades operativas en la pista 25R/07L

Tal y como se puede observar en la siguiente figura (fig. 3.5.3.3), el objetivo en este caso es aumentar la distancia de las aeronaves en aproximación, con el objetivo de generar la distancia de seguridad mínima necesaria que permita una operación de salida entre dos operaciones de llegada. A continuación se presentan los pasos llevados a cabo:

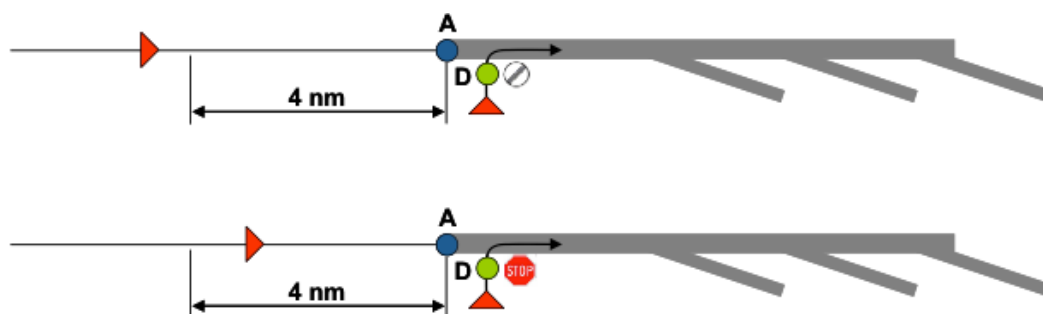


Fig. 3.5.3.5. Distancia de 4nm entre llegadas permitiendo la salida de una aeronave, siempre que esta se encuentre a una distancia superior a 4nm. *(Fuente: Airport Research Center- CAST Aircraft)*

Además de los elementos, presentados en apartados anteriores, que definen una pista en CAST Aircraft, es necesario implementar los siguientes elementos:

- 2.1. En primer lugar, se introducirá un punto de control (*Waypoint*) a una distancia de 4nm¹⁸ desde la cabecera de la pista, permitiendo establecer la distancia mínima que debe respetar una aeronave respecto a su predecesora (se trate de una aeronave en fase de despegue o de aterrizaje).
- 2.2. En segundo lugar, es necesario realizar una definición de las restricciones de paso (*Passage Constraints*) para las aeronaves en espera del punto “RWY 25R_Departure_Holding” bien sea el Q1 o el Y1. A continuación la figura 3.5.3.6 muestra las restricciones implementadas:

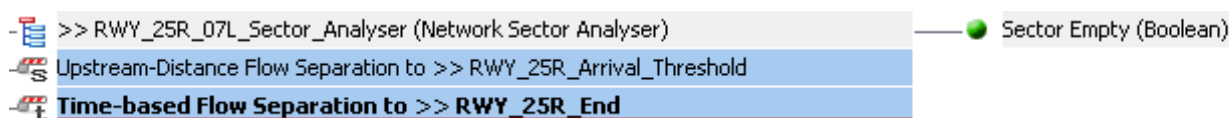


Fig. 3.5.3.6. Restricciones de paso del punto de espera para despegue Y1. *(Fuente: Creación propia. CAST Aircraft)*

Estos elementos permitirán el uso de la pista 25R/07L para su uso combinado (despegues y aterrizajes) tal y como se muestra en la Fig. 3.5.3.5.

Por consiguiente, a continuación se presenta la implementación que permite, en caso de existir alguna aeronave en los puestos para el despegue Q1 y Y3, aumentar la distancia de seguridad mínima de una aeronave en fase de aterrizaje.

¹⁸ Nm (*Nautical Miles*): La milla náutica es una unidad de longitud empleada en navegación marítima y aérea. Es equivalente a 1852 metros.

2.3. En primer lugar, es necesario instalar un detector de cola (*Queue detector*) con el objetivo de conocer si existe alguna aeronave en el punto de espera Q1 y Y3 (Punto de salida de aeronaves con *Abnormal_Operations*)

2.4. En caso de que exista una aeronave en cola, mediante el siguiente proceso introducido en un punto de control situado a 10nm de la cabecera de la pista (distancia de seguridad máxima para una relación Super Heavy - Light), se permite variar la distancia mínima de seguridad entre aeronaves de 4nm a 8nm (entre dos aeronaves de categoría Heavy) permitiendo de esta manera intercalar una operación de despegue.

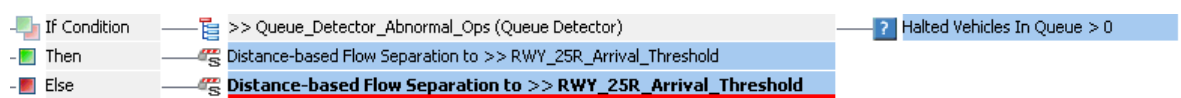


Fig.3.5.6.7. Lógica aplicada que permite variar la distancia mínima de seguridad entre aeronaves (*Fuente: Creación propia*)

- **Resultados obtenidos y conclusiones:**

En este caso, la imposibilidad de obtener datos empíricos válidos en relación al problema planteado vienen motivados por la falta de datos en relación a las aeronaves que sufren problemas de performance en el aeropuerto de Barcelona-El Prat. Aún y así, cabe destacar el hecho de que mediante la solución presentada se consigue obtener un modelo que permita de manera rápida y fácil determinar las aeronaves afectadas por problemas de performance. Permitiendo, a posteriori la simulación de los diferentes escenarios de una manera fácil.

A modo de conclusión y en relación a los objetivos planteados inicialmente, destacar que se ha conseguido implementar una solución factible del problema que permita realizar un estudio AMAN/DMAN de esta situación particular de la pista 25R/07L. Por otro lado, el objetivo de minimizar los retrasos planteado no ha podido ser implementado debido nuevamente a la falta de información de la operativa aeroportuaria de Barcelona.

- **Problema 3:** *Mejorar la eficiencia, minimizar los retrasos y reducir el tiempo de espera en los puntos de espera para despegue G1,G2,G3 que dan acceso a la pista 25L.*

- **Introducción al problema y situación inicial:**

Uno de los puntos más críticos en relación a la operativa de cualquier aeropuerto es la gestión de los despegues, el conocido como **DMAN problem** (Departure Management). En el caso del aeropuerto de Barcelona existen diversos puntos que pueden ser identificados como críticos a la hora de gestionar las operaciones de despegue. En este caso el análisis se centra en los puntos de espera para G1,G2 y G3 que dan acceso a la pista 25L (activa para despegue en configuración habitual Oeste).

Si se tiene en cuenta la siguiente figura (Fig.3.5.3.3) que contiene la información relacionada con el rodaje y despegue de aeronaves en configuración de pista activa Oeste, se pueden observar los tres puntos de espera definidos para la espera y secuenciación de aeronaves previo al despegue.

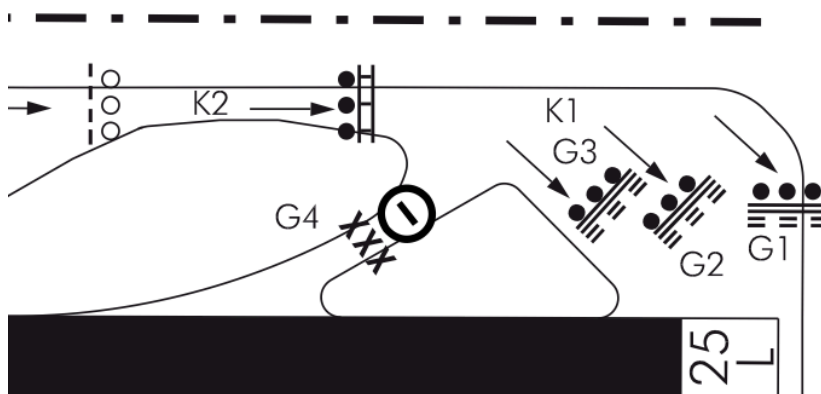


Fig.3.5..3.3 Puntos de espera para despegue G1,G2,G3 que dan acceso a la pista 25L (Configuración Oeste). (*Fuente:* AENA. *Información AIP LEBL*)

Según la información publicada en el AIP (*Airport Information Publication*) del aeropuerto, cada uno de los puntos de espera (G1,G2,G3) puede ser ocupado por una única aeronave independientemente del tipo y de las características de esta. En caso de concentrarse mas de tres aeronaves en espera, las siguientes deberán permanecer en el punto de espera K2 hasta que alguno de los puntos de espera G quede libre.

Por consiguiente, el problema que se plantea en este caso radica en tratar de encontrar cual es la asignación de puntos de espera y los intervalos de salida, con el objetivo de minimizar los retrasos y los costes producidos por congestión de la zona de despegue.

A continuación se presenta un grafico (**grafico 3.5.3.4**) extraído como resultado de la simulación del modelo, en el que se muestran y definen los tiempos máximos de espera de cada aeronave que se encuentre atravesando esta zona.

En el podemos observar como los tiempos de espera aumentan en los intervalos de tiempo que van de las 07:30-08:30 y de las 13:45-14:45. A su vez, los datos aportan que un total de 58 aeronaves (50 en el punto de espera G3 (amarillo) y 8 para G2(verde)) han sufrido retrasos respecto a su horario previsto, utilizando la mayor parte de estas el punto de espera G3 (dado que es el que supone una distancia de rodaje menor). En este punto de espera G3, se ha registrado un retraso máximo de 02:20 minutos y un retraso de 01:52 minutos si tenemos en cuenta el Top-95 (el 95% de las aeronaves).

Por lo tanto podemos observar una desigual distribución de aeronaves entre los 3 puntos de espera, resultando en una mayor congestión del punto de espera G1.

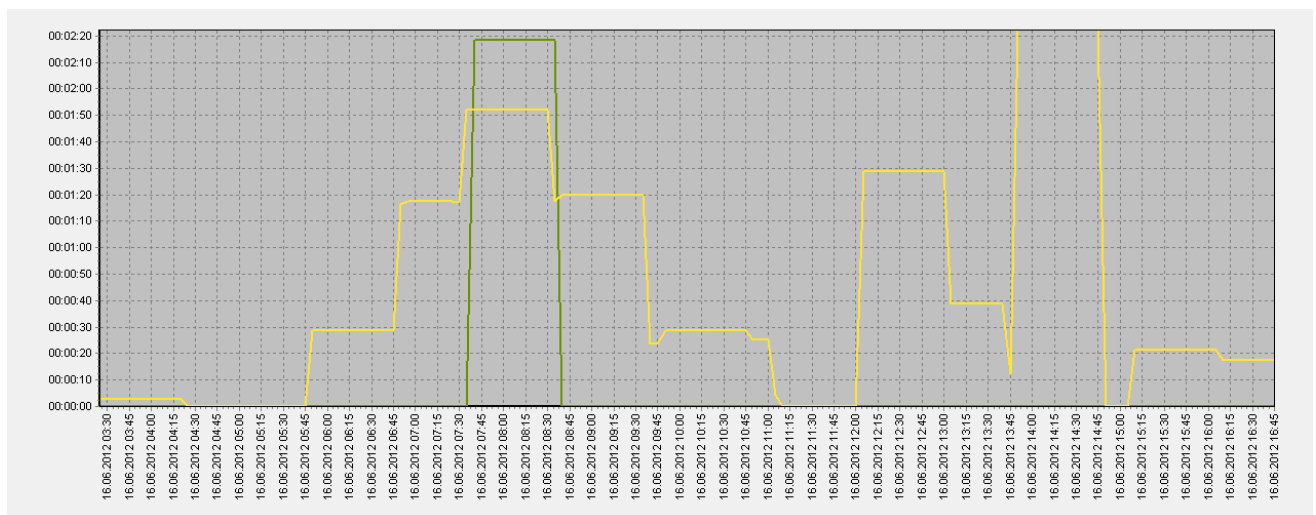


Gráfico 3.5.3.4 Gráfico extraído de la simulación del modelo, en el que se muestran los tiempos máximo de espera en cada uno de los puntos de espera para despegue de la pista 25L. (*Fuente: Creación propia – Log analyser CAST Aircraft*)

Si comparamos estos resultados con el siguiente gráfico (**gráfico 3.5.3.5**) que nos muestra el volumen de trafico por cada instante de tiempo podemos observar una correlación entre los retrasos generados y el volumen de trafico registrado.

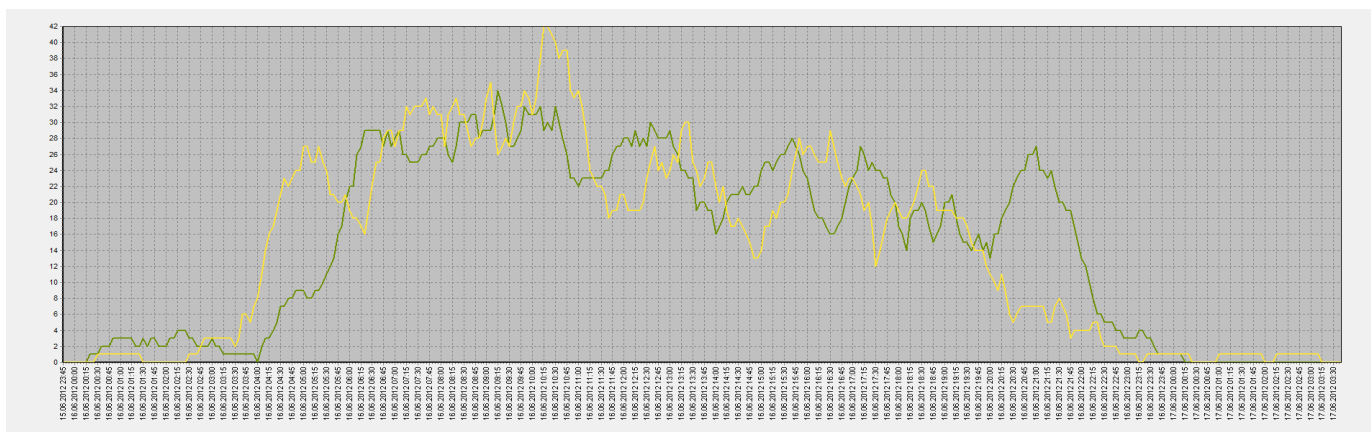


Gráfico 3.5.3.5 Grafico extraído de la simulación del modelo del aeropuerto de Barcelona en el que se puede observar el volumen de trafico dividido en salidas(amarillo) y llegadas (verde). (*Fuente: Creación propia – Log analyser CAST Aircraft*)

Por lo tanto, teniendo en cuenta que el tiempo de retraso es una variable dependiente, que a su vez depende de diferentes variables independientes como el volumen de trafico o el tipo de aeronave, el objetivo de problema es encontrar una asignación que minimice los tiempos totales de espera y por lo tanto los retrasos debidos a estas esperas.

- **Objetivos en relación al problema planteado:**
 - Analizar los diferentes datos obtenidos en la simulación del modelo con el objetivo de encontrar las causas generadoras de retrasos en los puntos de espera de la pista 25R.
 - Estudiar y definir la estrategia de asignación que minimice el tiempo de espera y los retrasos.
 - Analizar los resultados obtenidos mediante la estrategia planteada con el objetivo de encontrar una solución optima.
- **Soluciones preliminares del problema:**
 - Asignar y distribuir las aeronaves en los puntos de espera dependiendo de su categoría de su estela turbulenta¹⁹. De esta manera, se podrían realizar una asignación de cola de despegue que minimice el tiempo total de espera.
 - Introducir cambios dinámicos del recorrido de las aeronaves y la asignación de puntos de espera. De esta manera se distribuirán las

¹⁹ **Estela turbulenta (Wake turbulence):** es la turbulencia que se forma detrás de un avión a medida que este pasa a través del aire. Según OACI, las aeronaves deben respetar mínimos de separación basados en la categoría de turbulencia. A su vez esta, esta se fija respeto a la masa máxima de despegue (MTOW). Estas categorías se categorizan como: *Light, Medium y High*.

aeronaves de manera dinámica dependiendo de la cola de despegue existente en cada punto de espera.

- Asignar y distribuir las aeronaves en los puntos de espera dando prioridad a aquellas aeronaves que acumulen un mayor retraso respecto a la hora asignada de salida. De esta manera, se pretende reducir de manera individual el tiempo total de retraso del conjunto de aeronaves.

- **Solución definitiva:**

Teniendo en cuenta las utilidades y herramientas que nos ofrece el software CAST Aircraft y atendiendo a la componente estocástica de los tiempos de retraso, la solución más inteligente pasa por la introducir una componente dinámica que sea capaz de adaptarse a la estocasticidad presente en el modelo.

Se introducirá por lo tanto, un control dinámico de asignación de puntos de espera que distribuirá las aeronaves en cada uno de los tres puntos analizando de manera continua la cantidad de aviones que se encuentran en espera. Este análisis, alterara en tiempo real el recorrido prefijado de las aeronaves.

A su vez, será necesario establecer prioridades de salida entre los diferentes puntos de espera, para dar solución a las situaciones en que los tres puntos se encuentren ocupados. En estos casos, se ha optado por establecer una prioridad “*First come First served*”, es decir tendrán prioridad de despegue aquellas aeronaves que hallan llegado en primer lugar al punto de espera independientemente de su categoría, retraso o condición.

- **Implementación de la solución en el modelo:**

Con el objetivo de implementar una asignación y distribución dinámica de las aeronaves entre los puntos de espera para despegue G1,G2,G3 de la pista 25L son llevados a cabo los siguientes procesos:

- 1. Distribución dinámica de aeronaves dependiendo del volumen de aeronaves en espera en cada punto.**

- 1.1. Introducción de un elemento analizador de cola (*Queue Analyser*) por cada uno de los puntos de espera para despegue. Este elemento permitirá conocer el número de aeronaves en cola por cada momento y de manera dinámica.

- 1.2. Introducción de un punto de control (*Waypoint*), situado como se puede observar en la figura 3.5.3.6 en la calle de rodaje que da acceso a los puntos de espera de la pista. Este punto de control permitirá mediante el uso de la herramienta comando

(Command) la asignación dinámica de aeronave, en relación a la lógica establecida.

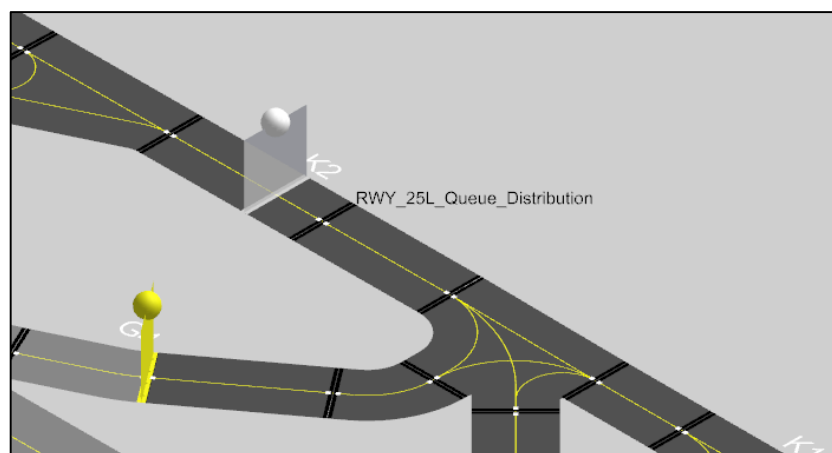


Fig. 3.5.3.6. Punto de control implementado para la distribución de las aeronaves en relación a una lógica pre establecida (**Fuente:** Creación propia)

- 1.3. A continuación se establecerá una lógica "If...Else" que permitirá designar el punto de espera al que debe dirigirse cada aeronave, dependiendo del número de aeronaves que se encuentran actualmente en cada punto. La figura 3.5.3.7 muestra la lógica empleada.

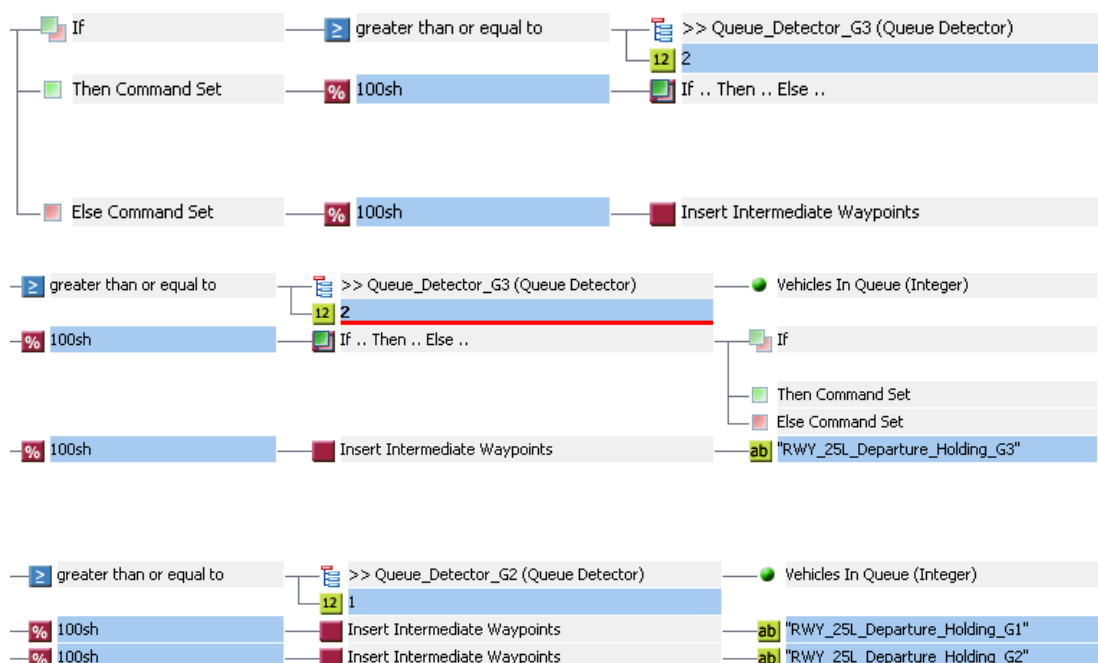


Fig. 3.5.3.7 Lógica de distribución dependiendo del volumen de aeronaves en cola para despegue. (**Fuente:** Creación propia)

- **Resultados obtenidos y conclusiones:**

Con el objetivo de presentar los resultados obtenidos, a continuación se presentan diversos gráficos obtenidos en relación a las simulaciones realizadas, una vez implementada las nuevas políticas de gestión de los puntos de espera para despegue.

El primer gráfico nos muestra el tiempo máximo de espera de la primera aeronave de la cola para cada punto de espera:



Gráfico 3.5.3.9 Gráfico extraído de la simulación del modelo, en el que se muestran los tiempos máximo de espera en cada uno de los puntos de espera para despegue de la pista 25L (Una vez implementadas las políticas descritas en el apartado). (**Fuente:** Creación propia – Log analyser CAST Aircraft)

Si se compara este primer gráfico, con los resultados obtenidos antes de implementar la nueva política, se puede observar como claramente ha disminuido el tiempo máximo de espera por aeronave.

Situándose su máximo, en el caso del punto de espera G3, en 00:55 minutos y un Top-95 de 00:48 minutos (respecto a 02:20 de máximo y 01:52 del Top-95 en caso de utilizar la política anterior). En el caso del punto de espera G2 en un máximo de 00:40 y un Top-95 de 00:25 (respecto a 02:18 de máximo y 00:57 de Top-95). Por último en el caso del punto de espera G1 el retraso máximo se sitúa en 00:35 y un Top-95 de apenas 00:12 (en este caso no es posible comparar con los resultados iniciales, dado que ninguna aeronave utilizó el punto G1 para realizar el acceso a la pista activa 25L).

En la siguiente tabla (Tabla 3.5.3.10.) se pueden observar los anteriores datos de forma concisa y resumida:

| | Situación inicial | | Resultados con nueva política | |
|-----------------|-------------------|--------|-------------------------------|--------|
| | Máximo | Top-95 | Máximo | Top-95 |
| Punto espera G1 | - | - | 00:35 | 00:12 |
| Punto espera G2 | 02:18 | 00:57 | 00:40 | 00:25 |
| Punto espera G3 | 02:20 | 01:52 | 00:55 | 00:48 |

Tabla 3.5.3.10. Resultados obtenidos mediante la solución planteada. *(Fuente: Elaboración propia CAST Aircraft)*

Los resultados obtenidos en relación a la nueva política nos muestran además que el número de aeronaves con retraso ha disminuido hasta las 27 (17 para el punto G1, 8 para el punto G2 y 3 para el punto G1).

A su vez, el segundo gráfico muestra el número máximo de aeronaves por cada punto de espera:

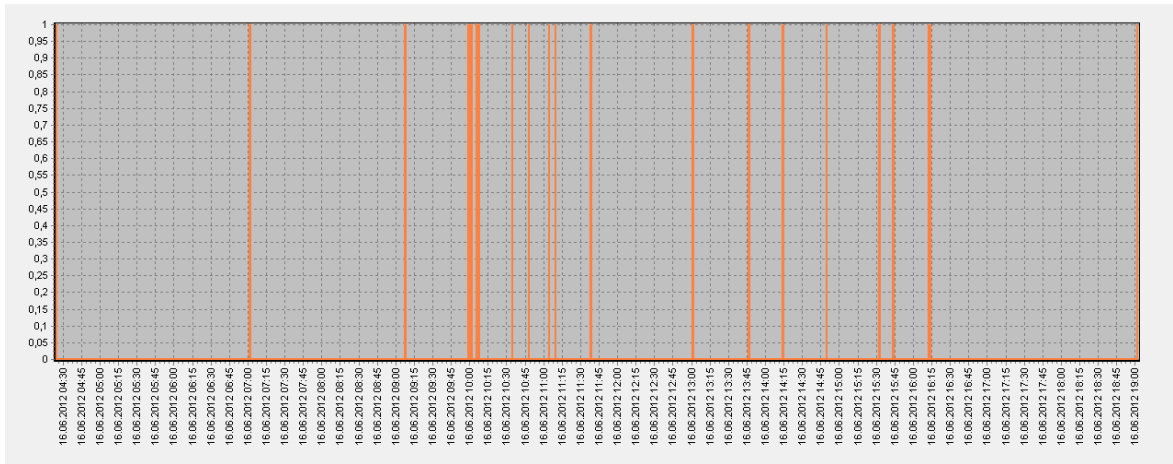


Gráfico 3.5.3.11 Gráfico extraído de la simulación del modelo, en el que se muestra en número máximo de aeronaves en un punto de espera durante el transcurso de la simulación. *(Fuente: Creación propia – Log analyser CAST Aircraft)*

Como se puede observar en este gráfico, tal y como se ha definido previamente, y de acuerdo con las restricciones impuestas el número máximo de aeronaves en los puestos de espera G3 y G2 es siempre inferior a 1, manteniendo en punto de espera G1 para el resto de aeronaves (dado que teniendo en cuenta su diseño de cola, es el que permite un mayor número de aeronaves).

4. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

4.1. Discusión y conclusiones

El objetivo general de este proyecto, ha sido evaluar la aplicabilidad de las herramientas de modelado y simulación, disponibles en la actualidad, en el sector aeroportuario. Con el objetivo de enfatizar este hecho, el proyecto se ha centrado en el proceso de modelado y simulación del Aeropuerto Internacional de Barcelona – El Prat siguiendo el ciclo de vida de un proyecto de estas características.

A modo de resumen, esta memoria comprende y muestra el proceso completo que abarca desde la elaboración del modelo teórico de la infraestructura aeroportuaria, la obtención de datos y formación necesaria, el modelado por ordenador del modelo teórico, la verificación y validación del modelo y por último la identificación de problemas en el modelo en relación a problemas en el sistema real.

Por consiguiente, el éxito del proyecto, se podría resumir en la consecución de los siguientes hitos u objetivos:

- Se ha obtenido un modelo por ordenador, capaz de simular la operativa del lado aire del Aeropuerto internacional de Barcelona - El Prat.
- Se ha validado y verificado el modelo realizado mediante la consulta a expertos responsables de la gestión del Aeropuerto de Barcelona. De este modo se ha conseguido obtener, un modelo valido para la experimentación y la simulación.
- El modelo implementado, ha permitido identificar y dar una solución preliminar a diversos problemas operacionales existentes en el aeropuerto de Barcelona.
- Se ha corroborado y validado el uso de CAST Aircraft como una herramienta cómoda y rápida para el modelado y simulación de infraestructuras aeroportuarias.
- Se han completado las etapas del ciclo de vida de un proyecto de modelado y simulación, en las que partiendo desde cero se han obtenidos resultados en relación al sistema analizado.
- Los resultados obtenidos han permitido aceptar las técnicas de modelado y simulación como herramientas útiles para la solución de problemas aeroportuarios.

Por último, a nivel personal, se ha cumplido con el objetivo de familiarización y aprendizaje de la herramienta de simulación aeronáutica CAST Aircraft. Además de

permitir mejorar el conocimiento en relación al funcionamiento operativo real de un aeropuerto de la magnitud e importancia como el de Barcelona.

4.2. Trabajo futuro

Teniendo en cuenta la complejidad y dificultad del sistema analizado (novenos aeropuerto internacional por número de pasajeros de Europa), se puede afirmar que gran parte del tiempo y esfuerzo dedicado a este proyecto, ha sido consumido en la etapa de elaboración del modelo teórico y modelo digital. Además el hecho de utilizar herramienta la herramienta de modelado y simulación *CAST Aircraft* ha requerido de una etapa de familiarización y aprendizaje de uso.

Este hecho, juntamente con la brevedad y la corta duración que se exige en un proyecto de estas características, ha imposibilitado abarcar la última etapa del ciclo de vida del proyecto, la etapa de simulación, con la extensión y dedicación requerida.

Como consecuencia, se plantea un trabajo futuro en relación al modelo obtenido, y que tendría como punto de inicio los problemas operativos detectados en la última fase del proyecto. Destacar que la mayor parte de estos problemas se encuentran, tal y como se especifica en la memoria, parcial o completamente implementados. Por lo tanto, sería necesario establecer un conjunto de escenarios de simulación que permitan obtener los datos necesarios para dar soporte a la toma de decisiones.

Asimismo, tal y como se ha comentado anteriormente, el hecho de contar con un modelo validado y verificado por personal experto del aeropuertos, permite tomar como válidos los resultados obtenidos a través de las diversas simulaciones a realizar.

En conclusión, la completa finalización de este proyecto y la obtención de los resultados finales queda supeditada a la realización de los trabajos futuros planteados.

BIBLIOGRAFÍA

DOCUMENTOS IMPRESOS

Libros y publicaciones

WACHUTKA, G. (1994). “*Problem Orientated Modeling of Micro transducers: State of the Art and Future Challenges*”. A, 41-42, 279-283.

FISHWICK, Paul A., (1995), “*Simulation Model Design and Execution*”. Prentice Hall Inc.

LAURILLARD, Diana, (1993), “*Rethinking University Teaching a framework for effective use of educational technology*”. Routledge.

GUASCH, Antoni. PIERA, Miquel Àngel. CASANOVAS, Josep. FIGUERAS, Jaume. (2002) “*Modelado y simulación. Aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios*”. Edicions UPC.

YELLIG, E. SAVORY, P. (1999), “*Simulation Modelling Presentations: The Life Cycle*” Proceedings of the 8th Industrial Engineering Research Conference, (ISBN: 0-89806-216-0). Ed. Taylor, Malstrom, Watson, Standley, Phoenix, AZ, May 1999.

LAW, A.M. & KELTON, W.D. (1991). “*Simulation, modeling and analysis*”. Singapore: McGraw-Hill Book Company

KREUTZER, W. (1986). “*Systems Simulation - Programming & Languages*”. Addison-Wesley

ALLEN, Theodore T. (2011). “*Introduction to Discrete Event Simulation and Agent-based Modeling: Voting Systems, Health Care, Military, and Manufacturing*”. 1st ed. Springer, 2011.

STERMAN, J. (2000) “*Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*”. Irwin/McGraw-Hill c2000.

HARTMAN, A.K. (2009) “*Practical guide to computer simulations*”. Singapore: World Scientific, 2009”

Artículos y Monografías

STEWART, Paul M., (2009), “*A brief story of simulation*”. Proceedings of the Winter Simulation Conference (WSC).

THOMAS G. DACOSTA J. (1979). “*A sample survey of corporate operations research*”. Interfaces, Vol.9.

DELANEY W., VACCARI E., “*Dynamic Models and Discrete Event Simulation*”, (1998). Simulation Journal.

LAW, A.M. (1986). “*Introduction to simulation*”. Industrial Engineering, May 1986.

BANKES, SC. (2002). “*Agent-based modeling: A revolution*”. Proc. National Academy of Sciences 99:Suppl. 3: 7199-200

BONABEAU, E. (2002). “*Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating systems*”. Proc. National Academy of Sciences 99: 7280-7

CASTI, J. (1997). “*Would-Be Worlds: How Simulation Is Changing the World of Science*”. New York: Wiley.

GASS, S. HARRIS, C. (1999-2011). “*System Dynamics, in Encyclopedia of Operations Research and Information Science*”. Kluwer Academic Publishers

SWEETSER, A. (2008). “*A Comparison of System Dynamics (SD) and Discrete Event Simulation (DES)*”

SUAU, P. PALLARES-BARBERA, M. (2008). “*Overcoming airport capacity and environmental tensions at Barcelona airport and in future airport development strategies*. Universitat Autònoma de Barcelona (UAB).

MUMAVIZ, S. SCHONFELD, P.(Editors.), “*Airport Modeling and Simulation, in the Proceedings of the International Conference on Airport Modeling and Simulation*”, Arlington, VA, August 17–22, 1997, New York: American Society of Civil Engineers, 1999.

AENA y MINISTERIO DE FOMENTO.(2001)“*Plan director del Aeropuerto de Barcelona*”.

Ponencia universitaria

BUIL, R. “*Bloc 1: Modelat de sistemes orientat a events discrets*” (2012). Modelització i simulació de sistemes. Universitat Autònoma de Barcelona (UAB)

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

Artículos y monografías electrónicas

“*Introduction to Modeling and Simulation. Historical Perspective*” [Consulta: 21 de Octubre de 2012]. [en línea] <<http://www.uh.edu/~lcr3600/simulation/historical.html>>

"The history of simulation in engineering" [Consulta: 21 de Octubre de 2012]. [en línea]
<<http://www.ise.ncsu.edu/jwilson/files/ierc09p.pdf>>

"System simulation. Introduction and Summary" [Consulta: 29 de Octubre de 2012]. [en línea]
<<http://home.ubalt.edu/ntsbarsh/simulation/sim.htm#rintroduction>>

REESE, G. "Buffon's Needle: An analysis and Simulation". [Consulta: 29 de Octubre de 2012]
[en línea]
<http://mste.illinois.edu/reese/buffon/buffon.html>

"Simulation. Role of simulation" [Consulta: 29 de Octubre de 2012] [en línea]
<<http://www.uh.edu/~lcr3600/simulation/contents.html>>

THOMAS, R. "What are simulations" [Consulta: 29 Octubre 2012] [en línea]
<<http://www.jelsim.org/resources/whataresimulations.pdf>>

WINTER SIMULATION CONFERENCE. "2012 Winter Simulation Conference". [Consulta: 1 de Noviembre de 2012] [en línea] <<http://www.wintersim.org>>

RJKMIN, M. "Advantages and disadvantages of model driven computer simulation" Rjkmin M.
[Consulta: 30 de Octubre de 2012] [en línea]
<<http://projects.edte.utwente.nl/pi/papers/simAdv.html>>

"Simulation pros and cons". Laboratory for Scientific Visual Analysis. [Consulta: November 1, 2012] [en línea].
<http://www.sv.vt.edu/classes/ESM4714/Student_Proj/class03/stillwater/prj/project>

"Introducción a la Simulación". Universidad de los Andes (Venezuela). [Consulta: 2 de Noviembre de 2012] [en línea]
<<http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/hhoeger/simulacion/PARTE1.pdf>>

"Sistemas de simulación". Universidad Pontificia de Madrid (ICAE). [Consulta: 2 de Noviembre de 2012] [en línea] <http://www.doi.icaei.upcomillas.es/simio/transpa/t_sim_ac.pdf>

"Introduction to modeling and simulation". Anu Maria. University of New York at Binghamton.
[Consulta: 4 de Noviembre de 2012] [en línea]
<http://www.inf.utfsm.cl/~hallende/download/Introduction_to_Modeling_and_Simulation.pdf>

"Introduction to modeling and simulation Part1" Bilkent Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü. [Consulta: 4 de Noviembre de 2012] [en línea]
<http://www.cs.bilkent.edu.tr/~cagatay/cs503/_M&S_02_Introduction.pdf>

"Basics of simulation and modelling II". K. Salah. [Consulta: 4 de Noviembre de 2012] [en línea] <<http://www.cs.wpunj.edu/~kaufman/cs404/Chap01Slides.ppt>>

"Clasificación de simulation systems". Donald Craig. [Consulta: 4 de Noviembre de 2012] [en línea] <<http://www.cs.mun.ca/~donald/msc/node8.html>>

"Simulación. Conceptos Básicos" [Consulta: 7 de Noviembre de 2012] [en línea]
<http://jair.lab.fi.uva.es/~pablfue/leng_simulacion/slides/0607/concbas_0607.pdf>

GETCHELL, A. “Agent-based Modeling”. Department of Physics. University of California. [Consulta: 8 de Noviembre de 2012][en línea]

<http://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/AgentBasedModeling.AdamGetchell.phy250.Report.pdf>

MACAL, C. NORTH, M. (2005) “Introduction to Agent-based Modeling and Simulation” [Consulta: 8 de Noviembre de 2012][en línea]

<http://www.mcs.anl.gov/~leyffer/listn/slides-06/MacalNorth.pdf>

MACAL, C. NORTH, M. (2005). “Tutorial on Agent-based Modeling and Simulation”. Proceedings 2005 Winter Simulation Conference. [Consulta: 8 de Noviembre de 2012][en línea]

<http://www.informssim.org/wsc05papers/002.pdf>

ANYLOGIC Simulation software. [Consulta: 7 Noviembre 2012][en línea]

<http://www.anylogic.com/>

NETLOGO Company. [Consulta: 7 de Noviembre de 2012][en línea]

<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>

ANYLOGIC Simulation software. “System dynamics society”. [Consulta: 12 de Noviembre de 2012][en línea] <http://www.anylogic.com/system-dynamics>

SYSTEM DYNAMICS SOCIETY. “The Field of System Dynamics”. [Consulta: 12 de Noviembre de 2012][en línea]

http://www.systemdynamics.org/what_is_system_dynamics.html

“Airport Modeling and simulation” [Consulta: 8 de Diciembre de 2012][en línea]

[http://ebooks.narotama.ac.id/files/Airport%20Engineering-Planning,%20Design,%20and%20Development%20of%201st%20Century%20Airports%20\(4th%20Edition\)/Chapter%2015%20Airport%20Modeling%20and%20Simulation.pdf](http://ebooks.narotama.ac.id/files/Airport%20Engineering-Planning,%20Design,%20and%20Development%20of%201st%20Century%20Airports%20(4th%20Edition)/Chapter%2015%20Airport%20Modeling%20and%20Simulation.pdf)

AIRPORT RESEARCH CENTER Website [Consulta: 8 de Diciembre de 2012][en línea]

<http://www.airport-consultants.com/>

SIMWALK Airport Simulation Software. [Consulta: 8 de Diciembre de 2012][en línea]

<http://www.Simwalk.com>

ARC PORT ALTO Simulation Software. [Consulta: 8 de Diciembre de 2012][en línea]

<http://www.arc-us-ca.com/>

AENA AEROPUERTOS. “Estadísticas de pasajeros aeropuertos españoles 2011”. [Consulta: 10 de Diciembre de 2012][en línea]

<http://www.aena-aeropuertos.es/csee/Satellite/estadisticas/es>

AENA AEROPUERTOS. “Aeropuerto Internacional Barcelona-El Prat” [Consulta: 10 de Diciembre de 2012][en línea]

<http://www.aena-aeropuertos.es/csee/Satellite/Aeropuerto-Barcelona/es/Inicio.html>

IATA. “IATA International Transport Association” [Consulta: 11 de Diciembre de 2012][en línea]

<http://www.iata.org/Pages/default.aspx>

GENERALITAT DE CATALUNYA (Gencat). [Consulta: 11 de Diciembre de 2012][en línea]

<http://www.gencat.cat>