

# Trabajo Fin de Máster

## Máster en Ingeniería Aeronáutica

Diseño básico funcional y constructivo de una  
plataforma de estacionamiento de aeronaves.  
Aeropuerto Internacional Jorge Chávez

Autor: Manuel Jesús Ibáñez Tirado

Tutor: Jorge Juan Fernández de la Cruz

**Dpto. Construcción y Proyectos de Ingeniería**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019







Trabajo Fin de Máster  
Máster en Ingeniería Aeronáutica

**Diseño básico funcional y constructivo de una  
plataforma de estacionamiento de aeronaves.  
Aeropuerto Internacional Jorge Chávez**

Autor:

Manuel Jesús Ibáñez Tirado

Tutor:

Jorge Juan Fernández de la Cruz

Profesor asociado

Dpto. de Construcción y Proyectos de Ingeniería

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Máster: Diseño básico funcional y constructivo de una plataforma de estacionamiento de aeronaves. Aeropuerto Internacional Jorge Chávez

Autor: Manuel Jesús Ibáñez Tirado

Tutor: Jorge Juan Fernández de la Cruz

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal



*A mi familia.*  
*A mis amigos.*  
*A Mila.*



# Agradecimientos

---

Con este Trabajo pongo punto final a mis estudios universitarios. Escribiendo estas líneas no paran de asaltarme numerosos recuerdos que he vivido a lo largo de estos años, desde los primeros años en el Grado, y ahora estos últimos en el Máster. Numerosas personas que comenzaron el camino, otras que se han unido, y otras que llegaron en los momentos finales y me ayudaron a dar ese último empujón que hace que hoy pueda expresar estas palabras.

Tantas personas a las que tengo que agradecer tanto que no podría incluirlas a todas en este agradecimiento, pero sé que, sin la ayuda de ellos, nada de esto hubiera sido posible.

Quisiera comenzar mis agradecimientos por mis padres. Sin duda son los principales pilares de mi vida, los que me han ayudado a ser lo que soy, los que me han enseñado a través de su esfuerzo y dedicación diario y, a los que sin duda, los quiero como a nadie. Ojalá sepa transmitirles a mis hijos al menos la mitad de lo que me habéis transmitido vosotros.

A mi hermano Antonio y a mi cuñada Sonia, gracias y mil gracias. Orgulloso de vosotros, de lo que sois, de cómo sois y de lo que habéis conseguido luchando juntos. Siempre estaré de vuestro lado, como hermano, como cuñado y como orgulloso tío.

A mi amigo, José María Pérez. Qué decir del que ha sido mi compañero de carrera desde que nos conocimos allá por el año 2012. Tantas horas compartiendo esfuerzos, sufrimientos y alegrías, tardes de salita y tardes de deporte. Seguiremos luchando por aquello que siempre iremos buscando en la vida, que es el triunfo profesional en todos los sentidos. Siempre encontrarás una mano tendida para echarte una mano, amigo.

A José, Milagros y Begoña, mi segunda familia. Muchas gracias por ese apoyo y esa confianza que depositáis en mí. Intentaré devolveros parte de ese cariño que me habéis dado desde que llegué a la familia. Sin duda, orgulloso de conoceros y profundamente agradecido por todo lo que hacéis por nosotros. A Leonor, la arquitecta peruana que me ha motivado a realizar este Trabajo y a la que le tengo un aprecio infinito.

Por último, agradecer a la persona que en poco tiempo ha sabido conquistarme como nadie nunca lo ha hecho, a la que le debo parte de la consecución de este Máster, y a la que le debo la alegría con la que vivo este momento. La persona que ha sabido complementarme, comprenderme, apoyarme, ayudarme y todo lo que una persona con su inmenso corazón ha podido aportarme en el tiempo que me ha acompañado y que espero que me acompañe el resto de mi vida. Muchas gracias, Mila García. Siempre.

*Manuel Jesús Ibáñez Tirado*

*Ingeniero Aeronáutico.*

*Sevilla, 2019*



# Resumen

---

Una plataforma de estacionamiento de aeronave se define como la zona habilitada para el aprcamiento de la aeronave, desde la cual se produce el embarque y desembarque de pasajeros, el llenado de combustible y todos los servicios de handling relacionados. Es una zona dónde la aeronave pasará desde pocos minutos hasta días, semanas o incluso años, por lo que debe ser capaz de soportar las cargas estáticas que producen las ruedas de los trenes de aterrizaje. También debe ser una zona fácilmente accesible por parte de los usuarios, tanto para los pilotos como para los trabajadores involucrados en las tareas que conlleva el estacionamiento de una aeronave.

Todo esto es lo que se ha tenido en cuenta para diseñar la plataforma de estacionamiento de aeronaves que dará servicio a la nueva terminal que se ejecutará en los próximos años en el aeropuerto internacional Jorge Chávez de Lima, Perú. Sin duda se trata de un aeropuerto referente dentro del transporte aéreo sudamericano y que, con la ampliación de las instalaciones que se van a dar y que van a alterar todo el campo de vuelo, se convertirá en el referente mundial que todos los peruanos esperan.

Con este trabajo se pretende realizar un diseño funcional a nivel operativo y constructivo, satisfaciendo todas las necesidades del creciente transporte aéreo que llegará a darse en un futuro próximo. Para ello, se realiza un estudio de la capacidad actual y de la capacidad futura, un análisis de la evolución que se espera y, en base a esto, dimensionar la plataforma de una manera eficiente dentro de las zonas disponibles para la misma.

La ejecución de la plataforma pretende resolver el problema que se generará en el momento en que se construya la nueva terminal, la cual se encargará de incrementar los tránsitos tanto de pasajeros como de aeronaves, y para la cual el aeropuerto Jorge Chávez debe de estar preparado.



# Abstract

---

An aircraft parking platform is defined as the area enabled for the parking of the aircraft, from which passenger embarkation and disembarkation takes place, the filling of fuel and all related handling services. It is an area where the aircraft will go from a few minutes to days, weeks or even years, so it must be able to withstand the static loads produced by the wheels of the landing gear. It must also be an area that is easily accessible by the users, both for the pilots and for the workers involved in the tasks involved in parking an aircraft.

All this is what has been considered to design the aircraft parking platform that will service the new terminal that will be executed in the next few years at the Jorge Chávez International Airport in Lima, Peru. Undoubtedly, it is a reference airport within the South American air transport and, with the expansion of the facilities that are going to be given and that will alter the entire flight field, it will become the world reference that all Peruvians expect.

The aim of this Project is to make a functional design at an operational and constructive level, satisfying all the needs of the growing air transport that will come soon. For this purpose, a study of the current capacity and future capacity is carried out, an analysis of the expected evolution and, based on this, to dimension the platform in an efficient way within the areas available for it.

The execution of the platform aims to solve the problem that will be generated now in which the new terminal is built, which will be responsible for increasing transits of both passengers and aircraft, and for which the Jorge Chávez airport must be prepared.



# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>8</b>
<b>Resumen</b>	<b>10</b>
<b>Abstract</b>	<b>12</b>
<b>Índice</b>	<b>14</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>16</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>18</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>21</b>
1.1. <i>Objetivos, alcance y justificación del Trabajo</i>	21
1.2. <i>Estructura Del Trabajo</i>	22
<b>3 Estado actual</b>	<b>25</b>
2.1. <i>Contexto económico</i>	25
3.1.1 Contexto económico nacional	25
3.1.2 Contexto económico del aeropuerto	26
2.2. <i>Entorno aeoportuario</i>	28
2.2.1. Entono aeroportuario actual	28
2.2.2. Nuevo aeropuerto	29
2.3. <i>Capacidad actual del campo de vuelo</i>	31
<b>4 Análisis del tráfico</b>	<b>35</b>
4.1 <i>Métodos de prevision del transporte aéreo</i>	35
4.2 <i>Previsión de pasajeros</i>	36
4.2.1 Serie histórica. Tráfico de pasajeros	36
4.2.2 Ajuste a series temporales	38
4.2.3 Planteamiento de escenarios	39
4.2.4 Elección de escenario	41
4.3 <i>Previsión de Aeronaves</i>	42
4.3.1 Serie histórica. Tráfico de aeronaves	42
4.3.2 Planteamiento de escenarios	42
4.3.3 Elección de escenario	46
4.3.4 Previsión de tráfico de aeronaves según modelo.	46
<b>5 Diseño geométrico</b>	<b>51</b>
5.1 <i>Aeronaves usuarias y tipos de puestos de estacionamiento</i>	52
5.2 <i>Distribución dentro del campo de vuelo</i>	57
5.2.1 Puestos en contacto	58
5.2.2 Puestos en remoto	59
5.3 <i>Simulaciones</i>	59
5.3.1 Simulaciones de entrada a puestos de estacionamiento	60
<b>6 Diseño de señalización e iluminación</b>	<b>63</b>
6.1 <i>Señalización horizontal</i>	63
6.1.1 Generalidades	63

Aeropuerto Internacional Jorge Chávez

---

6.1.2	Señalización en calles de rodaje y de acceso a estacionamiento.	63
6.1.3	Señalización en plataforma	65
6.1.4	Señalización en viales	67
6.2	<i>Características de la pintura</i>	68
6.2.1	Pinturas en pavimento de hormigón	68
6.2.2	Pinturas en pavimento asfáltico	68
6.2.3	Método de aplicación	68
6.3	<i>Señalización vertical</i>	68
6.3.1	Señalización de plataforma	68
6.4	<i>Iluminación</i>	69
6.4.1	Requerimientos relativos a deslumbramientos	70
<b>7</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>72</b>
	<b>Referencias</b>	<b>74</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2–1. Inversión estimada de proyectos en cartera de sector transporte (en millones de US\$). <i>Fuente: IPE.</i>	26
Tabla 4–1. Clasificación de puestos de estacionamiento actuales. <i>Fuente: AIP.</i>	32
Tabla 3–1. Serie histórica de tráfico de pasajeros (pasajeros por año y porcentaje de crecimiento). <i>Elaboración propia.</i>	37
Tabla 3–3. Predicción de tráfico de pasajeros para los ajustes Lineal, Logarítmico, Exponencial y Polinómico (pasajeros por año). <i>Elaboración propia.</i>	39
Tabla 3–4. Escenarios Optimista, Lógico y Pesimista de tráfico de pasajeros (pasajeros por año). <i>Elaboración propia.</i>	40
Tabla 3–5. Serie histórica de tráfico de aeronaves (número de operaciones por año y porcentaje de crecimiento). <i>Elaboración propia.</i>	42
Tabla 3–7. Escenarios Optimista, Lógico y Pesimista de tráfico de aeronaves (número de operaciones por año). <i>Elaboración propia.</i>	43
Tabla 3–6. Predicción de tráfico de aeronaves para los ajustes Lineal, Logarítmico, Exponencial y Polinómico (número de operaciones por año). <i>Elaboración propia.</i>	45
Tabla 3–7. Serie histórica de tráfico de según el tipo (número de pasajeros y porcentaje de crecimiento para cada año). <i>Fuente: lima-airport.com. Elaboración propia.</i>	46
Tabla 3–8. Movimientos de aeronaves en 2017 clasificado en función del tipo (número de operaciones y porcentaje del total para cada modelo). <i>Fuente: lima-airport.com. Elaboración propia.</i>	48
Tabla 3–9. Previsión de movimiento de aeronaves según el tipo (número de movimientos de aeronaves para cada modelo). <i>Elaboración propia.</i>	49
Tabla 4–4. Características de las aeronaves. <i>Fuente: manuales de fabricantes.</i>	52
Tabla 4–5. Características de los tipos de puestos de estacionamiento.	53
Tabla 4–1. Márgenes de separación en los puestos de estacionamiento de aeronaves. <i>Fuente: Anexo 14 de OACI.</i>	54
Tabla 3–1. Operaciones de las aeronaves usuarias durante 2017 y puestos de estacionamiento. <i>Fuentes: AIP y lima-airport.com.</i>	55
Tabla 3–1. Serie histórica (número de puestos de estacionamiento para cada modelo). Tráfico de aeronaves.	56



# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Ingresos aeroportuarios entre 2001 y 2017 (en millones de US\$). <i>Fuente: lima-airport.com</i>	27
Figura 2-2. Traslados del aeropuerto al Estado peruano (en millones de US\$). <i>Fuente: lima-airport.com</i>	27
Figura 2-3. Características físicas de las pistas. <i>Fuente: AIP.</i>	29
Figura 2-3. Esquema de la ampliación del aeropuerto internacional Jorge Chávez. <i>Fuente: lima-airport.com</i>	30
Figura 3-1. Serie histórica de tráfico de pasajeros (pasajeros por año en el intervalo 2005-2017). <i>Elaboración propia.</i>	37
Figura 3-3. Crecimientos del tráfico de pasajeros en el período 2005-2017 (expresado en % por año). <i>Elaboración propia.</i>	38
Figura 3-3. Ajustes Lineal, Exponencial, Polinómico y Logarítmico de la tendencia del tráfico (predicción a partir del año 2018, expresado en pasajeros por año). <i>Elaboración propia.</i>	38
Figura 3-5. Evolución de los escenarios Optimista, Lógico y Pesimista del tráfico de pasajeros (pasajeros por año). <i>Elaboración propia.</i>	41
Figura 3-6. Evolución de los escenarios Optimista, Lógico y Pesimista del tráfico de aeronaves (número de tráficos por año). <i>Elaboración propia.</i>	44
Figura 3-6. Serie histórica de tráfico de aeronaves (número de operaciones por año). <i>Elaboración propia.</i>	44
Figura 3-7. Serie histórica de tráfico según el tipo. <i>Elaboración propia.</i>	47
Figura 3-7. Parcelas disponibles para la ejecución de las plataformas. <i>Fuente: lima-airport.com</i>	51
Figura 4-2. Tipos de puestos de estacionamiento. <i>Fuente: OACI.</i>	53
Figura 4-3. Plataforma de estacionamiento diseñada. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	58
Figura 4-4. Plataforma de estacionamiento diseñada. Puestos en contacto. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	58
Figura 4-5. Plataforma de estacionamiento diseñada. Puestos en remoto. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	59
Figura 4-6. Acceso a los puestos de estacionamiento remotos por parte de aeronaves tipo C. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	60
Figura 4-7. Salida de los puestos de estacionamiento remotos por parte de aeronaves tipo C. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	60
Figura 4-8. Salida y entrada a los puestos de estacionamiento en contacto por parte de un B747. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	61
Figura 4-8. Salida y entrada a los puestos de estacionamiento en contacto por parte de un A380. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	61
Figura 5-1. Señal de eje de calle de rodaje. <i>Fuente: OACI.</i>	64
Figura 5-2. Señal de borde de calle de rodaje. <i>Fuente: OACI.</i>	64
Figura 5-3. Señal de dirección o destino. <i>Fuente: OACI.</i>	64
Figura 5-4. Señal de Borde de Área de Movimiento. <i>Fuente: OACI.</i>	65
Figura 5-5. Señal de límite ed Área de restricción de equipos. <i>Fuente: OACI.</i>	65

Figura 5-6. Señal de línea de Área de no estacionamiento. <i>Fuente: OACI.</i>	66
Figura 5-7. Señal de entrada de puesto de estacionamiento. <i>Fuente: OACI.</i>	66
Figura 5-8. Señal de indicación de puestos de estacionamiento. <i>Fuente: OACI.</i>	66
Figura 5-9. Señal de barra de rueda de morro e identificación de tipo de aeronave. <i>Fuente: OACI.</i>	67
Figura 5-10. Señal de borde de vial en plataforma. <i>Fuente: OACI.</i>	67
Figura 5-11. Esquema de colocación de cartel. <i>Fuente: OACI.</i>	69
Figura 5-12. Especificaciones dimensionales del A380. <i>Fuente: Airbus</i>	70
Figura 5-13. Tipo de puesto proyector.	71



# 1 INTRODUCCIÓN

---

Los comienzos del aeropuerto Jorge Chávez se remontan al año 1960, cuando se pretendía dar una solución para remplazar al aeropuerto que en ese momento se encontraba operativo en la zona, el aeropuerto de Limatambo, el cual había quedado cercado por el crecimiento urbano de la ciudad de Lima. Toma su nombre del pionero de la aviación peruana Jorge Chávez Dartnell, el primer hombre en cruzar los Alpes con un monoplano en 1910. Tras varios años de construcción, se inaugura oficialmente el 30 de diciembre de 1965. Considerado como uno de los aeropuertos más modernos de la época en América Latina, se destacaba del resto gracias a su terminal de pasajeros, muy avanzada y de reconocido prestigio arquitectónico. Tras la culminación del aeropuerto, no se sucedieron cambios importantes en su arquitectura, más allá de pequeñas remodelaciones y ampliaciones.

En 2001, el aeropuerto pasa de ser un aeropuerto gestionado por el gobierno del Perú a ser explotado por la el consorcio germano-estadounidense Lima Airport Partners (LAP), buscando la ampliación y remodelación integral del mismo. En base a esta adquisición, se destinó muchos esfuerzos económicos y profesionales con el objetivo de hacer de este aeropuerto un referente dentro del sector aeroportuario a nivel nacional e internacional.

Pronto comenzaron a solicitarse proyectos enfocados en la idea de posicionar al Aeropuerto Jorge Chávez en la lista de aeropuertos de clase mundial. Se encargó por ello el diseño de ampliación y remodelación integral de la terminal de pasajeros, dándose comienzo de las primeras obras en 2001 y concluyéndose la primera fase a comienzos de 2015. Más tarde, en 2009, se dio comienzo a la segunda fase de remodelación de la terminal y la ampliación de la zona comercial. A nivel de campo de vuelo, se aumentó la capacidad de la plataforma de aeronaves, incrementándose en un 84%, acumulando un total de 304.881 m<sup>2</sup>. Además, se ejecutó un recapado de la pista en 2011 y la inclusión de un ILS Cat III y un nuevo radar, aspectos que justifican que este aeropuerto se encuentra dentro de los aeropuertos más seguros del mundo a nivel operativo.

El aeropuerto ha sido galardonado desde el año 2009 hasta el año 2015 como el mejor aeropuerto de Sudamérica en cuanto a su calidad de servicios que brinda

A finales de 2018 y comienzos de 2019, se dio comienzo a la tercera fase del proyecto, fase que incluirá una nueva pista de aterrizajes. Se prevé que esta pista logre reducir el intervalo de aterrizajes y despegues de 30 a 5 minutos, según palabras del presidente del grupo empresarial. Se proyectará como una pista paralela, al oeste de la que existe actualmente, y operará con las mismas características que la existente. Debido a esto, se aumentará considerablemente la capacidad de operación del aeropuerto. Es aquí donde se justifica el presente Trabajo Fin de Máster.

## 1.1. Objetivos, alcance y justificación del Trabajo

Debido a la actual remodelación y ampliación que se está realizando dentro del aeropuerto internacional Jorge Chávez, el tráfico aéreo tanto de pasajeros como de aeronaves va a incrementarse notoriamente en un intervalo de tiempo relativamente corto. La ejecución de la nueva pista de aterrizajes acompañada de la construcción de

la nueva terminal de pasajeros hará que el tráfico que se da en el aeropuerto llegue hasta duplicarse. El número de puestos de estacionamiento, ya de por sí escasos para los actuales tráfico, no son suficientes para abastecer la creciente demanda de estacionamientos, además que son puestos que están diseñados para aeronaves que se encuentran lejos de dar servicio a las aeronaves más modernas, con unas especificaciones técnicas novedosas. Es por ello que el objetivo principal que se plantea en el presente trabajo es el siguiente: el diseño de una plataforma de estacionamiento de aeronaves que dé servicio a la pista actual y a la nueva que se ejecutará, y que sea capaz de adaptarse a las especificaciones técnicas de los nuevos modelos de aeronaves que el mercado aeronáutico traerá en un futuro próximo. Los puntos más importantes que se van a tener en cuenta a la hora de realizar el dimensionamiento de la plataforma son los siguientes:

- Proyectar una zona de estacionamiento de aeronaves que dé servicio a la nueva pista y a la nueva terminal proyectada en el aeropuerto internacional Jorge Chávez.
- Realizar esta proyección de la manera más económica, eficaz y eficiente posible, teniendo en cuenta la futura demanda de las instalaciones aeroportuarias.
- Proyectar una zona de maniobras fácilmente accesible y clara para poder desarrollarse con seguridad los movimientos de las aeronaves, sin poner en peligro la integridad tanto de las aeronaves en movimiento como de las aeronaves estacionadas.
- Ejecutar una plataforma de estacionamiento que sea capaz de abastecer la demanda creciente de aeronaves en un horizonte temporal de corto a medio plazo.
- Dar una solución eficiente y acorde a la nueva distribución que se conseguirá tener dentro del campo de vuelo del aeropuerto.

Cada uno de estos puntos quedan justificados a lo largo de los distintos capítulos de los que se compone el Trabajo, en los que siempre se ha ido buscando soluciones y justificaciones que clarifiquen dichos puntos.

Este Trabajo, como se ha referido anteriormente, parte de la base de la ampliación de las instalaciones del aeropuerto, es decir, se justifica en la creación de la nueva terminal de pasajeros y en la ejecución de la nueva pista. Sin que se den algunas de estas condiciones, la creación de la nueva plataforma carece de sentido, pues pretende dar una solución eficaz al problema que se creará tras la ampliación de las instalaciones.

Como se muestra con posterioridad a lo largo de los capítulos, el tráfico tanto aéreo como de pasajeros va a sufrir un crecimiento importante, motivado por la situación estratégica del propio aeropuerto, que se erige como uno de los focos de tránsito aéreo de toda América Latina, y también por la ampliación que acaba de ser expuesta. Todo esto hace que la experiencia del pasajero y de las compañías sea más agradables, y vendrá acompañada de mayores ofertas de destinos, aumentándose la ocupación media de las aeronaves... Todo esto hace que resulte de especial interés el proyectar una zona de estacionamiento de las aeronaves que se espera que lleguen en un futuro no muy lejano. Aeronaves como las que se encuentran actualmente y aeronaves con diseños novedosos a las cuales el futuro del transporte aéreo le guarda un hueco dentro del panorama internacional.

La necesidad de ejecutar una plataforma de estacionamiento de aeronaves resulta vital a la hora del diseño de la nueva zona de maniobras que dará servicio a las dos pistas de aterrizaje y a la nueva terminal proyectada. Una zona de estacionamiento que se pretende que sea accesible, adecuada al tráfico futuro y eficiente con respecto a la zona de ejecución disponible.

En este punto radica fundamentalmente la justificación del presente trabajo, en que la plataforma de estacionamiento de aeronaves proyectadas es necesaria para la absorción de la demanda creciente que se espera que alcance a este aeropuerto en los próximos años.

## 1.2. Estructura Del Trabajo

El eje sobre el que gira el presente Trabajo es el diseño de la plataforma de estacionamiento. Para realizar un diseño lo más eficiente posible, resulta necesario realizar unos estudios previos que apoyen el diseño planteado y ayuden a ejecutarse de manera razonada y clara. Dentro de la definición de la plataforma de estacionamiento,

se hará un dimensionamiento de esta teniendo en cuenta el terreno disponible, las aeronaves que pueden hacer uso de esta y las conexiones de estas con las pistas de aterrizaje. Será necesario dimensionar una red de calles de rodaje que conecten ambas pistas con las plataformas de estacionamiento, de una manera sencilla y eficaz, con el fin de obtener una funcionalidad y una integración absoluta en el entorno del campo de vuelo.

Resulta necesario tener en cuenta que la ejecución de la plataforma dentro del campo de vuelo no sólo altera el entorno aeroportuario, sino también altera el desarrollo actual de las operaciones de las aeronaves. Con la creación de las nuevas instalaciones se abre un abanico de posibilidades para dirigir los tráficos dentro de la red de calles de rodaje y posiciones de estacionamiento, para las cuales se debe buscar siempre la que sea más eficiente tanto a nivel económico (para operadores aéreos) como a nivel operacional (para operadores aéreos y para el aeropuerto).

En primer lugar, se parte de una definición del estado actual del propio aeropuerto. En esta descripción se pretenderá acercar al lector el contexto económico que engloba al aeropuerto Jorge Chávez, dentro de la realidad del país al que pertenece, Perú. Además de esto, se mostrarán datos económicos que reflejen la importancia del aeropuerto dentro de la red de transportes del país. Todo esto irá acompañado de una descripción del estado del campo de vuelo obtenida gracias a la consulta del AIP del aeropuerto y de una explicación detallada de los aspectos más importantes de los que se compone la ampliación del aeropuerto. Se cerrará el capítulo con un estudio de la capacidad con la que cuenta el campo de vuelo actualmente, a nivel operacional y a nivel de estacionamiento. Para ello, será necesario realizar una serie de hipótesis simplificativas necesarias debido al desconocimiento y a la inaccesibilidad de cierta información necesaria para la elaboración del Trabajo.

Seguidamente se realizará un análisis del tráfico actual en el que, gracias a los datos obtenidos a través de la web del explotador aeroportuario, se muestran tráficos tanto de pasajeros como de aeronaves. Se pretenderá dar respuesta con esto a cómo se comportarán estos tráficos a lo largo de los próximos años, y servirá de base para la proyección de la plataforma de estacionamiento que se pretende diseñar. Estas previsiones se realizarán mediante ajustes puramente matemáticos, sabiendo las limitaciones con las que cuentan. Está claro el aspecto social es importante a la hora de determinar las posibles demandas de aeronaves, pero debido a su complejidad y desconocimiento, se opta por realizar el estudio a nivel matemático. A este nivel de cálculo llega también la ejecución de muchos proyectos dentro de la empresa privada, pues la incertidumbre que genera un estudio social hace que se escape este aspecto para los estudios de este tipo.

Tras el estudio del tráfico actual realizado en el segundo capítulo y el que se espera en el aeropuerto realizado en el tercero, se da paso al diseño geométrico de la plataforma de estacionamiento de aeronaves. Conociendo el tráfico que se espera en el aeropuerto, y sabiendo además la capacidad actual con la que cuenta el campo de vuelo, se pone de manifiesto las necesidades de estacionamiento futuras con las que se enfrentará el aeropuerto. Para apoyar al diseño, se realizan simulaciones de movimientos de aeronaves, poniendo de manifiesto la viabilidad operativa de las instalaciones proyectadas.

Se realizará, además, un breve resumen del sistema de ayudas visuales que ayudarán a los usuarios a guiarse dentro de la nueva plataforma de estacionamiento de aeronaves. Estas ayudas comprenden principalmente la señalización tanto horizontal como vertical. Además de esto, se pretende dar una solución a la iluminación de la plataforma, teniendo en cuenta los aspectos recogidos en la Normativa aeroportuaria y las especificaciones técnicas y características físicas de las aeromaves que operarán en la plataforma.

Por último, para cerrar el documento, se exponen una serie de conclusiones a nivel personal de parte del autor, extraídas de la consecución del estudio y el esfuerzo desarrollado para la consecución de este Trabajo Fin de Máster.

Anexo a la presente memoria pueden encontrarse dos anexos de cálculo:

- El primero de ellos es el anexo de cálculo de capacidad del área de maniobras del aeropuerto. En él se emplean diversas ecuaciones matemáticas y estadísticas que pretenden servir de fundamento para el cálculo de la capacidad empleado para el diseño de la plataforma de estacionamiento. Además, se exponen las distintas hipótesis de comportamiento tanto actual como futuro de las operaciones que se

realizan dentro del campo de vuelo.

- El segundo es el relativo al cálculo del paquete de firmes necesario para soportar las cargas de las aeronaves que harán uso de las zonas de estacionamiento. En este documento se pone de manifiesto el empleo de varios programas de cálculo que ayudan en la obtención de la distribución de espesores idónea con la que debe contar los pavimentos tanto rígidos como flexibles. Este anexo responde fielmente a un anexo de cálculo de firmes que puede encontrarse en la redacción de un Proyecto constructivo dentro de un campo de vuelo.

Además de estos anexos, la presente memoria se acompaña de un presupuesto que recoge todas las actuaciones necesarias y los materiales a emplear para la ejecución de lo planteado en el Trabajo. Para ello, se hará uso del Índice de Precios Peruano, actualizado al año 2018.

Por último, acompañando al resto de documentación se encuentran los planos descriptivos del Trabajo. En ellos puede encontrarse información visual de todo lo que se comenta a lo largo de la memoria, anexos y presupuesto. Datos de estos planos se encontrarán en la justificación del diseño dentro del capítulo de Diseño Geométrico.

El Trabajo se divide, por tanto, en las siguientes partes y capítulos:

- Memoria.
  - Estado Actual.
  - Estudio del Tráfico.
  - Diseño Geométrico.
  - Diseño de Señalización e Iluminación.
  - Conclusiones
- Anexos.
  - Cálculo de la capacidad del área de maniobras.
  - Cálculo de los pavimentos.
- Mediciones y Presupuesto.
- Planos.
  - Situación.
  - Estado actual.
  - Estado proyectado.
  - Simulaciones.
  - Señalización.

## 3 ESTADO ACTUAL

---

El Aeropuerto Internacional Jorge Chávez es el aeropuerto más importante a nivel nacional, ubicado en la ciudad del Callao, próxima al área metropolitana de Lima. Está ubicado en la provincia constitucional del Callao, pero es el aeropuerto natural de Lima y el más importante del Perú, pues concentra la gran mayoría de vuelos internacionales y nacionales del país, sirviendo a más de 22.000.000 de pasajeros por año. Representa el centro articulador de salidas y llegadas de pasajeros, así como de carga nacional e internacional.

Su ubicación estratégica en el medio de la costa oeste de América del Sur lo ha convertido en un importante centro de conexión del subcontinente. Destaca por sus enormes proyecciones en la conexión de vuelos entre las Américas, lo que ha traído como consecuencia un crecimiento sostenido en el flujo de pasajeros, carga y correo. Es el centro de operaciones para Sudamérica de Avianca Holdings con su asociación peruana Avianca Perú y de LATAM con su asociada peruana LATAM Perú.

Comparativamente, es uno de los aeropuertos sudamericanos mejor conectados con el resto del continente americano en cuanto a vuelos internacionales, superando inclusive a otros que poseen mayor volumen de pasajeros.

### 2.1. Contexto económico

#### 3.1.1 Contexto económico nacional

El desarrollo de la infraestructura es uno de los pilares básicos para que el Perú adquiera el nivel de competitividad y desarrollo comparable al de otras naciones de su entorno, como Chile. De acuerdo con el reporte de competitividad del WEF (World Economic Forum) del 2018, el Perú se encuentra en el puesto 63 del ranking de 140 países (Chile, uno de los líderes sudamericanos se encuentra en el puesto 33), siendo la puntuación de Perú en infraestructura de 62.4 en una escala de 1 a 100 (frente al 75.2 de Chile). En términos relativos y de acuerdo con el reporte de competitividad del WEF, el Perú, entre 2011 y 2016, ha retrocedido en infraestructuras de caminos y ha mejorado levemente en infraestructuras ferroviarias.

De acuerdo con el Plan Nacional de Infraestructura 2016-2025, elaborado por Afin y la Universidad del Pacífico, se estima que la brecha de infraestructura para el período 2016-2025 es de US\$ 159,549 millones. En cambio, para el Instituto Peruano de Economía (IPE), la brecha en este sector (ferrocarriles, carreteras, aeropuertos y puertos) asciende a US\$ 57,499 millones para ese mismo período.

La brecha de infraestructura total en aeropuertos según el estudio del IPE, alcanza los US\$ 2,378 millones, lo cual representa el 4.13% del total de la brecha del transporte.

Tabla 3–1. Inversión estimada de proyectos en cartera de sector transporte (en millones de US\$). *Fuente: IPE.*

Sub-sector	Proyectos de inversión	Brecha estimada (2016-2025)
Ferrocarriles	25,759	16,983
Carreteras	10,247	31,850
Aeropuertos	2,849	2,378
Puertos	1,481	6,287
TOTAL	40,336	57,499

El Plan estratégico elaborado por CORPAC S.A. para el período (2017-2021) coincide en sus objetivos estratégicos con las metas sectoriales trazadas por el Plan Estratégico Sectorial Multianual del Sector Transportes y Comunicaciones (PESEM) 2016-2023.

Dada las limitaciones que tenía el Estado frente a la ejecución y mantenimiento de las infraestructuras del transporte, en los últimos 18 años, se ha dado impulso a las concesiones de transporte, a fin de garantizar el desarrollo y su correcto funcionamiento. En ese sentido, de acuerdo con el Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, en búsqueda de mejorar la calidad de los servicios y la infraestructura de transporte aeroportuaria, se continuó con el proceso de promoción de la inversión privada en el sector, que se inició en 2001 con la entrega de la concesión del Aeropuerto Internacional Jorge Chávez al consorcio Lima Airport Partners. Dentro de dicho esquema, se tuvo programada la entrega en concesión de los aeropuertos administrados por la Corporación Peruana de Aeropuertos y Aviación Comercial S.A. (CORPAC S.A.).

Los aeropuertos entregados en concesión son:

- Aeropuerto Internacional Jorge Chávez.
- Primer Grupo de Aeropuertos de Provincia de la República del Perú: 12 aeropuertos, aeropuertos del Norte, Oriente y Sur del país.
- Segundo Grupo de Aeropuertos de Provincia de la República del Perú: 6 aeropuertos.

De acuerdo con el Plan Estratégico CORPAC S.A. 2017-2021, para el período 2018-2021, se proyecta un crecimiento del 6% en el volumen anual de pasajeros tanto nacionales como internacionales. El crecimiento proyectado del movimiento nacional de operaciones aéreas y de pasajeros transportados se sustenta en las perspectivas favorables del crecimiento económico nacional, crecimiento del turismo, incremento poblacional, entre otros aspectos.

En lo concerniente al movimiento internacional, las expectativas son igualmente favorables, ya que se espera un crecimiento sostenido del turismo, incremento de la demanda de vuelos y crecimiento de la flota de aviones, aspectos que convierten a América Latina en uno de los mercados aéreos más importantes a escala internacional.

La infraestructura actualmente existente en el Perú en materia aeroportuaria es insuficiente, como queda demostrado en los índices de competitividad del Foro Económico Mundial (WEF), año 2018.

### 3.1.2 Contexto económico del aeropuerto

Durante el año 2017, el Aeropuerto Internacional Jorge Chávez experimentó un crecimiento en todos los ámbitos. El EBITDA generado fue de US\$ 117,96 millones, que representa un crecimiento del 12% con respecto 2016. Este resultado se debió principalmente a los mayores ingresos aeronáuticos y comerciales, obtenidos gracias al crecimiento del 9.3% del flujo de pasajeros, que alcanzó un total de 20.6 millones, así como a una mayor eficiencia en los gastos operativos.

En el año 2017 el valor económico directo generado fue más de US\$ 346 millones (alrededor de US\$ 253 millones por servicios aeronáuticos y US\$ 94 millones por servicios no aeronáuticos), siendo US\$ 30 millones más que en 2016.

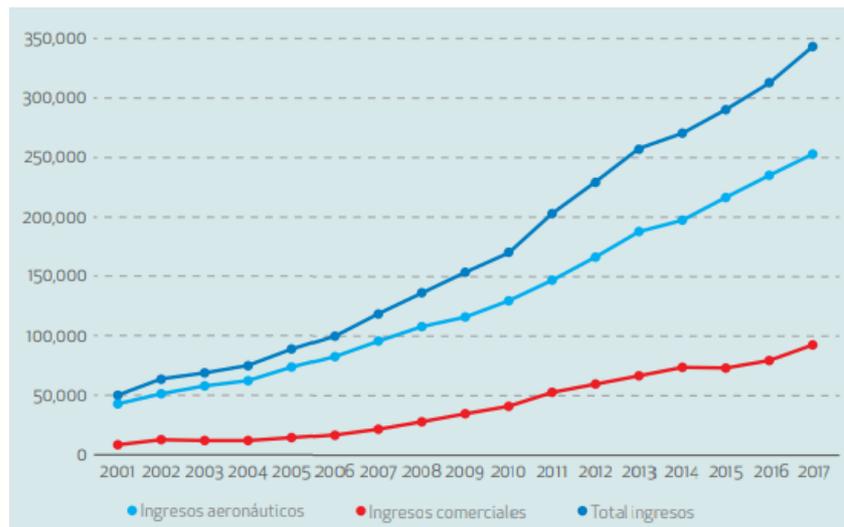


Figura 3-1. Ingresos aeroportuarios entre 2001 y 2017 (en millones de US\$). Fuente: lima-airport.com

Puede apreciarse en la figura anterior la importancia de los ingresos no aeronáuticos o comerciales. El aeropuerto Jorge Chávez no es ajeno a la tendencia al alza de estos ingresos, los cuáles se esperan que crezcan a nivel mundial en todos los aeropuertos. En la Edición número 20 de la publicación *ACI World Airport Economics Report* del año 2017, a nivel global, estos ingresos no relacionados directamente con la explotación de las aeronaves suponen un promedio del 44% de los ingresos totales de los aeropuertos. En el caso del Aeropuerto Jorge Chávez, en el año 2017 supusieron un 27% del total, esperando que alcance las cotas estimadas por los estudios económicos en pocos años. Sin duda, la construcción de la nueva pista, la nueva terminal, y el tema que ocupa el presente Trabajo, la plataforma de estacionamiento, contarán con un papel esencial en este crecimiento.

A lo largo de 2017 se realizan transferencias al Estado por un total de US\$ 256.21 millones, comprendiendo las retribuciones por los ingresos brutos, la retribución a CORPAC y la tasa regulatoria a Ositran (Organismo Supervisor de la Inversión en Infraestructura de Transporte de Uso Público).

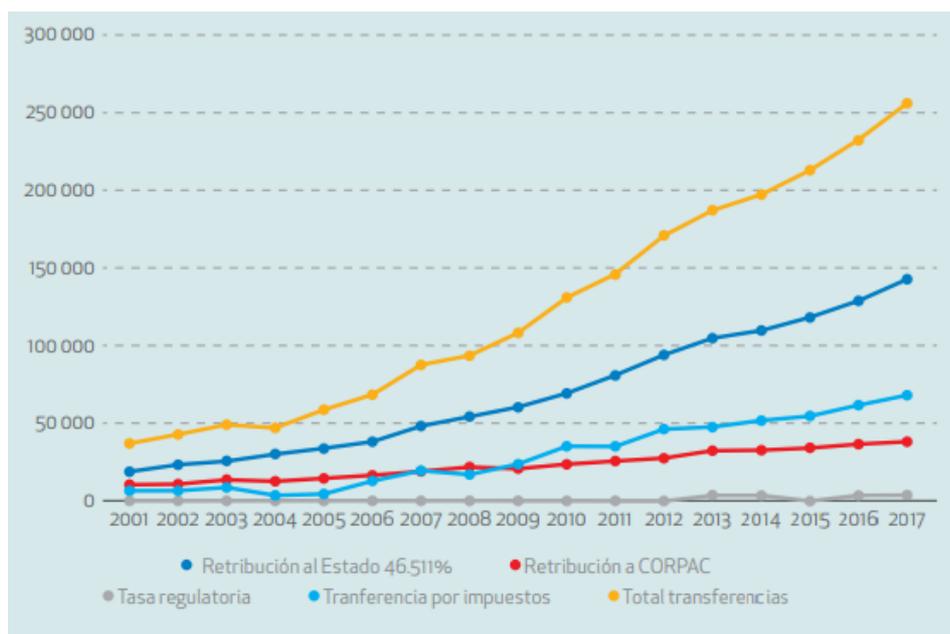


Figura 3-2. Trasferencias del aeropuerto al Estado peruano (en millones de US\$). Fuente: lima-airport.com

En cuanto a las inversiones efectuadas, ascendieron a US\$ 23 millones referidas principalmente en mejoras de la actual infraestructura del aeropuerto, así como en los trabajos preparatorios para la ejecución de las obras de ampliación del aeropuerto. Desde 2001 hasta 2017, el total de inversiones acumulado asciende a más de US\$ 399 millones.

No se tienen datos económicos del año 2018 pero, observando la clara tendencia ascendente que se tiene desde los comienzos del 2010, es de esperar que se haya crecido en este año y se siga creciendo en un futuro próximo. Por ello, plasmando los ingresos generados por el aeropuerto y las transferencias al Estado peruano, se justifica la inversión monetaria que se tiene proyectada en el aeropuerto. Esto multiplicará los ingresos, al conseguirse una mayor capacidad aeroportuaria que no sólo reportará beneficios al aeropuerto y a su región, sino a todo un país completo. Aumentar las instalaciones aeroportuarias supone la clave para potenciar los ingresos aeroportuarios, pues un aeropuerto con mayor capacidad es un aeropuerto que puede absorber un mayor tráfico de pasajeros y aeronaves, abriéndose nuevas rutas internacionales e incrementándose el número de tránsitos.

## 2.2. Entorno aeroportuario

### 2.2.1. Entorno aeroportuario actual

El Aeropuerto Internacional Jorge Chávez cuenta con una clasificación OACI con número de clave 4 (pista mayor de 1800 m), y letra clave E. Cuenta con una pista, con orientación 15/33, cuyas características obtenidas del AIP del propio aeropuerto se resumen en la figura 2.3.

Cuenta con una plataforma de estacionamiento de aeronaves, ejecutada en hormigón, con 51 posiciones de estacionamiento de aeronaves, recibiendo cada una de 3 a 4 aeronaves de media en un día. La iluminación se realiza mediante postes proyectores que se encargan de iluminar los puestos de estacionamiento mencionados, de manera que cada puesto de estacionamiento está iluminado por dos postes. En cuanto a las calles de rodaje:

- A/A1/B/C/E/F/1: 22.5 m de ancho ejecutadas de hormigón.
- D/G: 30 m y 23 m de ancho respectivamente, ejecutadas de hormigón.

El horario de operación actual en el Aeropuerto de acuerdo con el AIP es H24, aunque el grueso de las operaciones aeroportuarias se da en las franjas horarias diurnas.

La resistencia del pavimento que se recoge en la figura 2-3 da información acerca del tipo de aeronaves que puede soportar. En el Anexo de Pavimentos se ampliará la información necesaria para conocer perfectamente si el tipo de pavimento resiste qué tipo de aeronaves, qué paquete de firme es el ejecutado en estos casos...

Para arrojar un poco de luz al tema de las características físicas de la pista, la resistencia de estas se mide en base a dos conceptos fundamentales:

- PCN: *Pavement Classification Number*. Indica la resistencia de una pista de aterrizaje en base a una nomenclatura que recoge información del tipo de pavimento, la resistencia de la base existente bajo el pavimento, presión máxima de neumáticos y método de cálculo.
- ACN: *Aircraft Classification Number*. Expresa el efecto relativo de carga de una aeronave en el pavimento de la pista para una categoría de grado estándar especificada.

Ambos valores son comparados, siendo idóneo que el PCN de una pista o calle de rodaje sea superior al ACN. En casos aislados, y bajo unas condiciones específicas, el ACN podría ser superior al PCN, aunque no es lo recomendable.

La siguiente figura, extraída del AIP del aeropuerto, muestra las características físicas de la pista existente en el aeropuerto.

12 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS PISTAS						
NR RWY	BRG GEO y MAG	Dimensiones de RWY (M)	Resistencia (PCN) y SFC	Coordenadas THR	Elevación THR y máxima de TDZ de RWY APP precisión	
1	2	3	4	5	6	
15	154° GEO 155° MAG	3507 x 45	PCN 74 /R/A/X/T Concreto	12°00'27.45"S-077°07'16.85"W	THR 14 M/46 FT NIL	
33	334° GEO 335° MAG	3507 x 45	PCN 74 /R/A/X/T Concreto	12°02'10.12"S-077°06'26.23"W 12°01'52.45"S-077°06'34.94"W →	DTHR 610 M	
Pendiente de RWY-SWY		Dimensiones SWY (M)	Dimensiones CWY (M)	Dimensiones franja (M)	OFZ	Observaciones
7		8	9	10	11	12
Ver gráfico		60 x 45	NIL	3627 x 300	NIL	LDG PA CATII y IIIA/IIIB TKOF según PROC
Ver gráfico		60 x 45	NIL	3627 x 300	NIL	LDGNPA TKOF según PROC

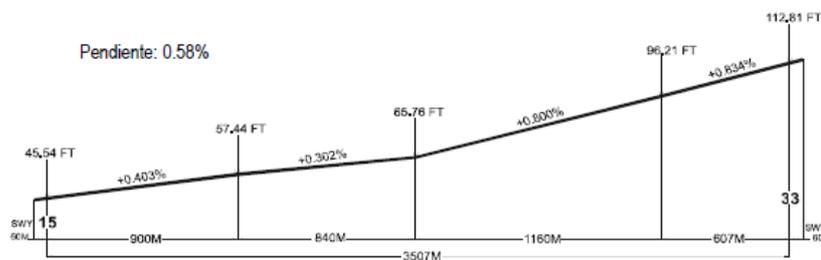


Figura 3-3. Características físicas de las pistas. Fuente: AIP.

### 2.2.2. Nuevo aeropuerto

El martes 25 de Julio de 2017 se dio inicio a la tercera fase de ampliación del aeropuerto internacional Jorge Chávez. Las obras de ampliación incluyen:

- Construcción de la segunda pista de aterrizaje.
- Nueva terminal de pasajeros.
- Nuevas zonas logísticas.
- Nueva torre de control.
- Dos niveles de acceso vehicular con amplia zona de estacionamiento.
- Hotel de 5 estrellas.
- Centro de convenciones.

El futuro aeropuerto Internacional Jorge Chávez será el más grande y moderno de la región, con una extensión de terreno de 9.000.000 m<sup>2</sup>. Se compone de un nuevo edificio terminal, añadiéndose a la existente, una nueva pista de aterrizaje con orientación paralela a la ya existente, una nueva torre de control y estación de rescate, un complejo empresarial con zonas logísticas y almacenes, centro de convenciones y hoteles. Para ello, se iniciaron 3 estudios, de los cuales uno ya ha finalizado.

- Estudio de la Superficie Limitadora de Obstáculos (SLO), el cual indica cómo se ven afectadas las superficies por las diferentes edificaciones o elementos que se han construido alrededor del aeropuerto a lo largo del tiempo.
- Proyección de Tráfico Aéreo, con el fin de obtener las proyecciones de pasajeros, aeronaves y carga hasta el final de la concesión, generando información sobre el tráfico y el tránsito que se tendría en el corto, medio y largo plazo.



## 2.3. Capacidad actual del campo de vuelo

Como se ha comentado, el aeropuerto cuenta actualmente con una única pista y una plataforma de estacionamiento de aeronaves, componiéndose de puestos en contacto con la terminal y puestos remotos. Esta, además del número de operaciones que se producen a lo largo del año, supone la totalidad de la información accesible públicamente que aporta el explotador aeroportuario. Por ello, resultará necesario estimar toda aquella información que puede que sea relevante para el diseño funcional de la nueva plataforma, tales como vuelos diarios, configuración de la pista, cabecera prioritaria para llegadas y salidas...

En el documento anexo a esta memoria se detallan los cálculos de capacidad, obtenidos a través de cálculos matemáticos. Lo ideal en estos casos es usar algún tipo de software que simule número de llegadas, salidas y recorridos, pero normalmente estos programas de cálculo son de difícil y costoso acceso. A nivel académico, se optará por estimar la capacidad del sistema de pistas y puestos de estacionamiento de manera genérica, empleando una relación de ecuaciones propias de Teoría de Colas y Estadística.

Al existir una sola pista, la configuración de esta será obligatoriamente una configuración mixta, en la que se dan las llegadas y salidas por la misma pista. La primera suposición que se hará será que se empleará la pista en el mismo sentido durante todo el año, pues se desconoce, como se ha comentado previamente, la configuración que emplea el aeropuerto. La configuración seleccionada en este caso es operando las llegadas y salidas por la cabecera 33, con configuración Noreste. La fundamentación de la elección se basa en:

- Los vientos son predominantes en configuración Sur-Norte, tomando como dirección predominante la que atraviesa la pista desde la cabecera 33 a la cabecera 15.
- Despegando desde la cabecera 33 se accede en un menor tiempo a la zona del mar, causando en este caso el menor impacto posible sobre la población aledaña al aeropuerto.

Puede consultarse la metodología empleada para el cálculo de la capacidad de la pista en el Anexo de Cálculo de Capacidad. El cálculo seguido para la obtención de la capacidad de la pista 15/33 es la metodología de configuración mixta, pues es la única posibilidad que puede contemplarse. En cambio, para obtener la capacidad del campo de vuelo con la existencia de las dos pistas paralelas, se abre una serie de posibilidades, a saber:

- Configuración de operaciones segregadas: Esto significa que se designa una pista preferente para las llegadas y otra preferente para las salidas. Esto debe darse cuando la separación de las pistas es menor de 780 m (2500 fts).
- Configuración de operaciones independientes: Las operaciones por pista se realiza de manera independiente, cada pista opera de forma aislada. Esto puede darse siempre y cuando la distancia entre las pistas supere los 780 m (2500 fts).

La separación que existirá entre la pista actual y la proyectada será superior a los 780 m (2500 fts), más concretamente 1500 m (4900 fts). Esto hace posible que puedan darse ambas configuraciones, incluso en un mismo día el aeropuerto pueda alternar entre operaciones segregadas y operaciones independientes.

Para el dimensionamiento de la nueva plataforma debe seleccionarse un tipo de configuración y, en base al volumen de operaciones esperada, dimensionar la nueva plataforma de modo que complemente la capacidad actual que tiene el aeropuerto con la pista 15/33. Parece claro que la configuración de operaciones segregadas no parece ser la más acertada para la futura configuración del campo de vuelo del aeropuerto Jorge Chávez. En el caso de que se seleccionara que las operaciones, o bien las llegadas o bien las salidas, se hagan por una pista, no se emplearía la totalidad de los puestos de estacionamiento, es decir, muchos de ellos no estarían accesibles para las aeronaves.

- Caso 1: Llegadas por la pista 15L/33R y salidas por la 15R/33L. Las llegadas las absorbe la pista existente y las salidas la nueva. Esto hace que las llegadas tengan la posibilidad de seleccionar los puestos de estacionamiento de la plataforma existente y de la nueva, pero a la hora de las salidas, las aeronaves que permanezcan en los puestos existentes se les hace imposible, o poco eficiente, llegar a la otra pista, pues eso implica atravesar la pista 15L/33R.
- Caso 2: Llegadas por la pista 15R/33L y salidas por la 15L/33R. Las llegadas las absorbe la pista nueva y las salidas la nueva. Esto se traduce en que la totalidad de las llegadas cuentan con acceso directo a la nueva plataforma, pero para llegar a la otra plataforma, sea necesario atravesar la pista existente.

- Caso 3: Llegadas y salidas por la misma pista, configuración de pistas independientes. Es la configuración más efectiva. En este caso, las llegadas y salidas que se realizan por la pista actual puedan tener la posibilidad de acudir a ambas plataformas y las llegadas y salidas por la pista nueva lo hagan desde o hacia los puestos de estacionamiento de la nueva plataforma.

El caso más adecuado será el 3, pues supone la optimización de las maniobras que puedan realizarse dentro del campo de vuelo. En base a esto, la nueva plataforma de estacionamiento de aeronaves debe diseñarse teniendo en cuenta que dará servicio a la totalidad de los tráficos que se produzcan en la pista nueva y a parte de los tráficos de la pista antigua. Posteriormente se detallará cual será la cantidad de tráficos para las cuales se diseña la plataforma.

De los cálculos detallados en el Anexo de Cálculo de Capacidad, se extrae que la capacidad del Sistema de Pistas en el estado actual, usando la única pista existente, la 15/33, se tiene:

$$C_{pista} = 27 \text{ aeronaves}$$

Se pasa ahora a obtener los valores de capacidad del sistema de estacionamiento. Actualmente el Aeropuerto Jorge Chávez cuenta con 58 puestos de estacionamiento, repartidos de la siguiente manera:

- Puestos en remoto: Puestos cuya posición no es adyacente a la terminal. Para el caso de embarque y/o desembarque de pasajeros, este se realiza mediante un servicio alternativo de jardineras del aeropuerto. Posiciones de la 01 a la 07, de la 51 a la 55, de la 60 a la 66, de la 71 a la 76, de la 27 a la 29, de la 40 a la 45 y de la 80 a la 85. En total son 39 posiciones.
- Puestos en contacto: Puestos cuya posición es adyacente a la terminal. En el caso de embarque y/o desembarque estos se realizan exclusivamente a través de las pasarelas de embarque o PLB. Posiciones de la 08 a la 26. En total son 19 posiciones.

En la siguiente tabla puede obtenerse la información del número de puestos existentes en el aeropuerto en función del tipo de estacionamiento:

Tabla 3–2. Clasificación de puestos de estacionamiento actuales. *Fuente: AIP.*

Tipo	Aeronaves usuarias	Número
I	B747, A380	3
II	A330	3
III	B767-300, B757-300	20
IV	B757-200	2
V	B727, MD82	1
VI	B737-800, A320	22
VII	CRJ-900	1
VIII	ATR-72, ATR-42	3

De la tabla se extrae lo siguiente:

- Existe un mayor número de puestos de aeronaves de reactores medios, siendo estos los que cuentan con mayor presencia dentro de las operaciones que se desarrollan en el aeropuerto.
- Seguido al número de puestos de aeronaves de reactores medios, se encuentran los puestos de aeronaves con reactores medio-pesados, destacando en este caso que son los más polivalentes, pues pueden abastecer a las aeronaves para las que han sido diseñados y otras aeronaves de menor tamaño.

Los cálculos de la capacidad del área de maniobras pueden consultarse en el Anexo a la presente memoria. Cabe mencionar que los valores obtenidos están claramente influenciados por las hipótesis realizadas, suponiendo una buena aproximación como estimación preliminar en este estudio de capacidad. Además de esto, no se ha tenido

en cuenta los posibles conflictos de circulación que puedan darse en los accesos a pistas, calles de rodaje o en la misma plataforma.

Puede observarse que los puestos de estacionamiento se encuentran próximos a estar desbordados por el creciente número de operaciones que se espera que se produzca en el aeropuerto Jorge Chávez. Es por ello que el diseño de los nuevos puestos debe estar encaminado a cubrir el crecimiento de los modelos de aeronaves, expuesto en el capítulo anterior.

En cuanto a la capacidad de los puestos de estacionamiento actuales, del mismo Anexo se extrae la siguiente capacidad:

$$C_{estac.act} = 97 \text{ aeronaves/hora}$$

Para la obtención de este valor se ha considerado que la totalidad de los puestos de estacionamiento cuentan con disponibilidad. Esto no se cumple en los casos en los que se tenga una aeronave estacionada con carácter de larga duración o en ocasiones en las que, debido a desarrollo de trabajos en las cercanías o de mantenimiento de los propios puestos, casos en los que el puesto de estacionamiento no está disponible. Por esta razón, este valor de capacidad puede considerarse una cota superior del mismo, siendo en la realidad menor.



# 4 ANÁLISIS DEL TRÁFICO

---

El objeto del presente capítulo es prever la evolución del tráfico aéreo de pasajeros y aeronaves que desarrollará el aeropuerto Jorge Chávez en los próximos años. Para realizar los distintos cálculos se siguen los criterios y procedimientos expuestos en el *Manual de Previsión del Tráfico Aéreo de OACI* (Doc 8991/2).

Dado que el carácter del presente Trabajo es meramente académico, carece de sentido realizar un análisis del tráfico para diseñar las obras objeto de este. En caso de que se llegara a ejecutar y, en proyectos desarrollados en empresas los cuales se culminan en aeropuertos reales, este análisis además de servir para ayudar a diseñar geoméricamente la plataforma de estacionamiento sirve además para determinar los períodos de tiempo en los que resulte más o menos recomendable la realización de los trabajos a proyectar. Por ello, el fundamento de la obtención de la previsión de tráfico aéreo va enfocado al conocimiento de este para realizar un dimensionamiento lo más eficiente posible, teniendo en cuenta el número y modelo de aeronaves que pueden hacer uso de las instalaciones.

Se comienza con las previsiones de desarrollo general del aeropuerto, particularizando el crecimiento esperado a la distribución por tipos de aeronave. Esta información es de gran utilidad a la hora de realizar el dimensionamiento de los paquetes de firmes del pavimento, los cuales se detallan en un Anexo a la presente memoria.

Los datos que se pretenden obtener en este capítulo son tanto cualitativos como cuantitativos, haciendo notar que las previsiones son siempre de carácter orientativo, dado el gran número de variables (aeronáuticas, económicas, sociológicas, tecnológicas, políticas...), de que depende el transporte aéreo. No se pretende, por lo tanto, que estas previsiones sean exactas, sino que la valoración realizada sea suficientemente razonable como para obtener un orden de magnitud de las cifras con que se trabajará posteriormente.

## 4.1 Métodos de prevision del transporte aéreo

Los principales métodos de previsión del transporte aéreo están englobados en tres grandes grupos:

- Predicción de tendencias.
- Métodos casuales.
- Métodos cuantitativos.

El método de predicción de tendencias se basa en el análisis de series históricas de las magnitudes de tráfico. Los tipos de curvas más utilizadas son la recta, la parábola, la exponencial, la potencial, la logarítmica y la polinómica. En todas ellas el tiempo aparece como una única variable explicativa independiente.

La predicción de tendencias proporciona una buena aproximación en el horizonte de 5 y 10 años. Para horizontes de 15 años se recomienda una revisión de las previsiones y su correspondiente ajuste de los resultados, según se van produciendo, pues no se puede asegurar que la tendencia se repita más allá de este intervalo temporal. Numerosas variables, entre ellas las sociales y económicas, se basan en el comportamiento humano, el cual se puede decir que es impredecible. Se empleará este método por ser el más viable y acorde al

calado del presente Proyecto.

Los métodos causales se basan en el empleo de modelos socioeconómicos. Los más utilizados son los modelos de regresión múltiple de variables socioeconómicas. El análisis de las previsiones según estos métodos es más realista, ya que se tiene en cuenta un mayor número de variables que influyen directamente en el tráfico del aeropuerto. El P.N.B., número de habitantes, plazas hoteleras y el consumo de energía son algunas de las variables normalmente utilizadas.

Los métodos cualitativos son los más utilizados por los expertos. Se apoyan en investigaciones de mercado mediante encuestas, en el consenso de expertos buscados por diversos métodos, en analogías con otros aeropuertos de similares características. El método cualitativo se halla implícito en este estudio, dentro de la valoración que se realiza de los resultados obtenidos por los métodos anteriores, a través de la experiencia en estudios similares.

Existe una compleja interacción entre el transporte aéreo y otros sectores económicos: así, un aumento de los ingresos y de la producción provoca un aumento de la demanda de tráfico, estableciéndose una relación de reciprocidad entre turismo, comercio y empleo, con el transporte aéreo. El crecimiento de la actividad económica aumenta los viajes de negocio, estimulando la necesidad de un transporte aéreo “rápido y eficaz”; el aumento de los ingresos personales y disponer de un mayor tiempo libre en la sociedad del ocio fomenta los viajes de turismo; el crecimiento del comercio interregional e internacional origina que los sectores más dinámicos de las distintas industrias confíen al transporte aéreo la distribución de sus productos aumentando la demanda de la carga aérea y ampliándose de ese modo los mercados para muchos tipos de productos.

De esta forma se pone de manifiesto el papel del transporte aéreo como catalizador del desarrollo económico y social. La disponibilidad de servicios de transporte aéreo ha creado los mercados básicos necesarios para el desarrollo de nuevas industrias y potencia las ventajas de unos territorios frente a otros, creciendo en importancia el papel del transporte aéreo en el desarrollo económico de las regiones y territorios al tenerse en cuenta las ventajas comparativas que ofrecen las infraestructuras de los sistemas aeroportuarios.

Este papel cobra mayor importancia si cabe en el caso del Perú, pues presenta algunas deficiencias en cuanto a infraestructuras de transporte frente a otros países de América Latina como Chile.

El crecimiento futuro del transporte aéreo seguirá dependiendo principalmente del crecimiento económico y comercial mundial, pero estará subordinado al grado en el cual esta industria hace frente a problemas fundamentales, tales como la congestión en los aeropuertos y en el espacio aéreo, la seguridad en los aeropuertos y en los vuelos, la protección del medio ambiente y las necesidades financieras en materia de inversiones.

## **4.2 Previsión de pasajeros**

### **4.2.1 Serie histórica. Tráfico de pasajeros**

Se han analizado los valores correspondientes al tráfico de pasajeros en el Aeropuerto Internacional Jorge Chávez para el período 2005-2017. Todos estos datos se han obtenido gracias a la consulta de las bases de datos del portal del explotador aeroportuario en cuestión, LAP. A través de las memorias que emite anualmente, en la que se exponen todos los datos relativos al aspecto económico y ambiental del aeropuerto, puede obtenerse información acerca del tráfico de pasajeros y aeronaves a lo largo de los años de registro.

En el cuadro siguiente se presentan los datos utilizados en las previsiones de tráfico realizadas.

Tabla 4-1. Serie histórica de tráfico de pasajeros (pasajeros por año y porcentaje de crecimiento). *Elaboración propia.*

Año	Total comercial	Crecimiento [%]
2005	5.661.517	-
2006	6.038.922	6.6
2007	7.511.891	24.4
2008	8.285.688	10
2009	8.780.442	5.9
2010	10.283.677	17.1
2011	11.794.818	14.7
2012	13.330.641	13
2013	14.908.772	11.8
2014	15.668.631	5.1
2015	17.112.536	9.2
2016	20.726.352	21.1
2017	22.674.129	9.4

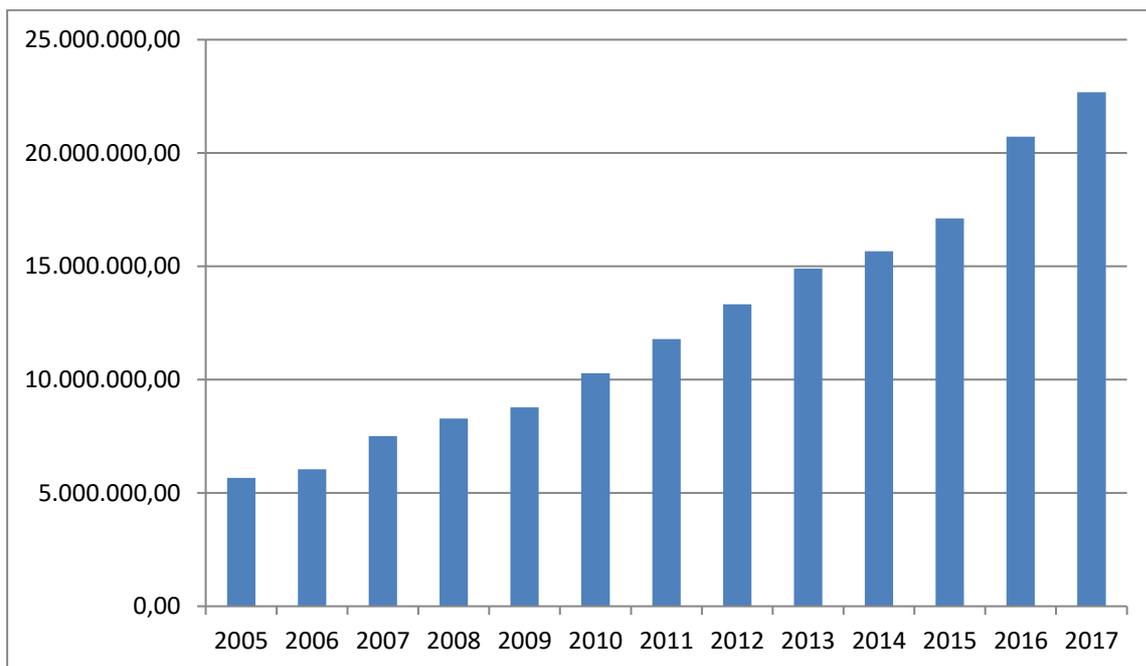


Figura 4-1. Serie histórica de tráfico de pasajeros (pasajeros por año en el intervalo 2005-2017). *Elaboración propia.*

Puede apreciarse una clara tendencia creciente, experimentando a lo largo de los años crecimientos que se encuentran entre el 10 y el 20%, a excepción del año 2014, donde el país experimentó la menor tasa de crecimiento económico en cinco años, un 2.35%, motivado por una fuerte contracción del sector pesquero y una caída de la actividad minera y de la manufactura, según informó el INEI.

Con los datos totales se analiza el crecimiento de pasajeros desde el año 2005 al año 2017, obteniéndose los siguientes resultados:

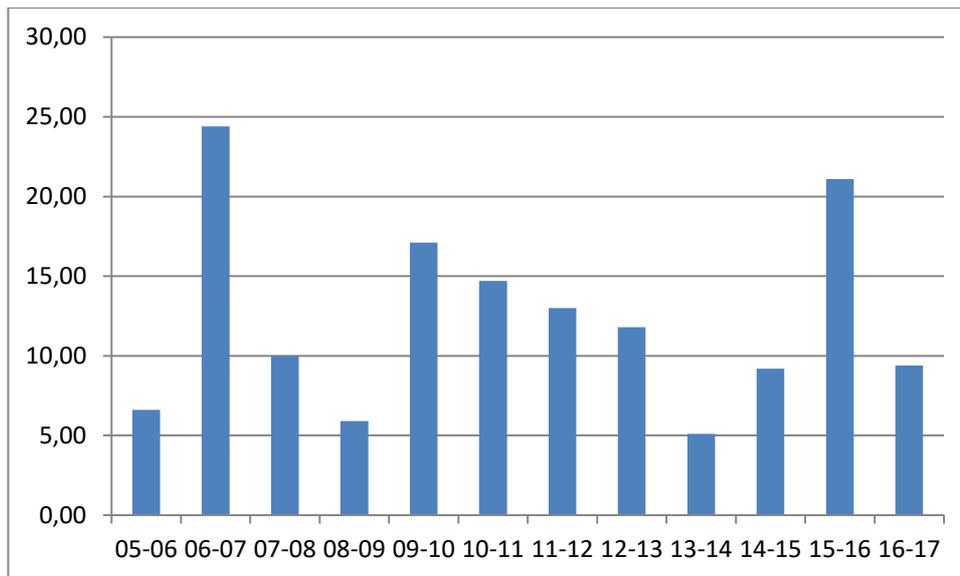


Figura 4-2. Crecimientos del tráfico de pasajeros en el período 2005-2017 (expresado en % por año).  
*Elaboración propia.*

#### 4.2.2 Ajuste a series temporales

En base a los datos expuestos con anterioridad, se procede a estimar cómo será el comportamiento futuro del aeropuerto en un horizonte considerable, hasta 2030, permaneciendo dentro del intervalo de los 15 años. Como se comentó con anterioridad, se empleará una predicción de tendencias, mostrando las distintas posibilidades de tendencia y los distintos escenarios que pueden darse.

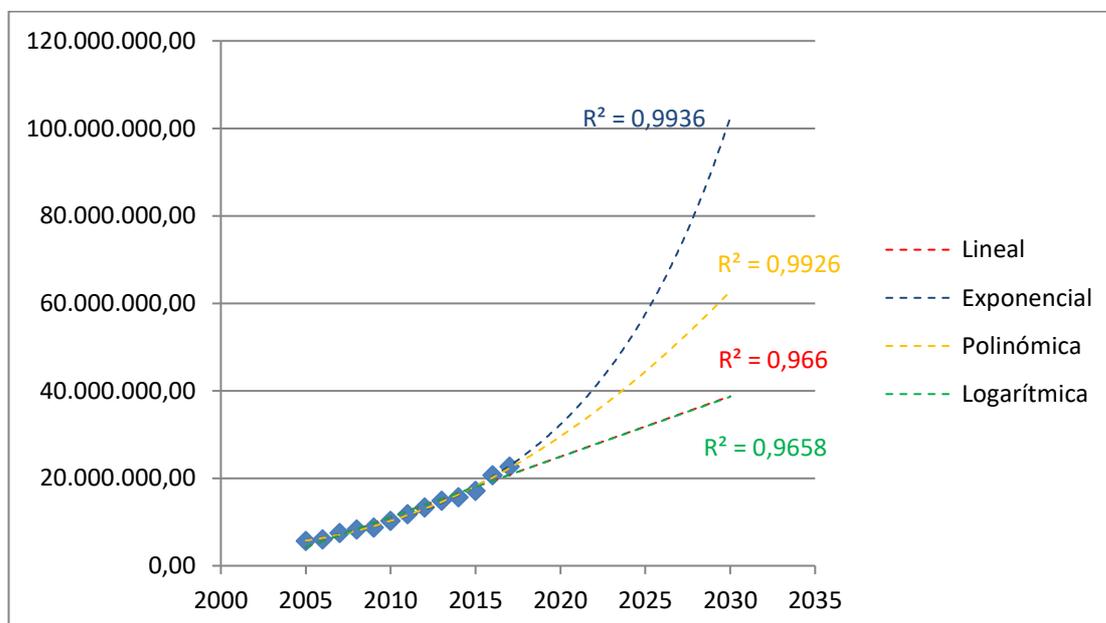


Figura 4-3. Ajustes Lineal, Exponencial, Polinómico y Logarítmico de la tendencia del tráfico (predicción a partir del año 2018, expresado en pasajeros por año). *Elaboración propia.*

Puede apreciarse que se ha estudiado las tendencias Lineal, Exponencial, Polinómica y Logarítmica, cuyas ecuaciones de ajuste y coeficiente de determinación.

- Ajuste Lineal

$$y = 10^6 \cdot x - 3 \cdot 10^9 \rightarrow R^2 = 0.966$$

- Ajuste Parabólico

$$y = 69068 \cdot x^2 - 3 \cdot 10^{0.8}x + 3 \cdot 10^{11} \rightarrow R^2 = 0.9926$$

- Ajuste Exponencial

$$y = 2 \cdot 10^{-94} \cdot e^{0.1155 \cdot x} \rightarrow R^2 = 0.9936$$

- Ajuste Logarítmico

$$y = 3 \cdot 10^9 \ln(x) - 2 \cdot 10^{10} \rightarrow R^2 = 0.9658$$

Todos los ajustes lineales se consideran buenos modelos de predicción, basando la afirmación realizada en el valor del coeficiente de determinación para los distintos ajustes, próximos a la unidad. Esto significa que los modelos se aproximan adecuadamente al comportamiento que ha tenido el tráfico de pasajeros dentro del intervalo de tiempo considerado y, en base a esto, pueden considerarse una buena aproximación para la predicción del comportamiento futuro del mismo.

En la siguiente tabla se recogen las previsiones de tráfico de pasajeros correspondientes a las diferentes regresiones, dentro del intervalo de tiempo 2018-2030.

Tabla 4–2. Predicción de tráfico de pasajeros para los ajustes Lineal, Logarítmico, Exponencial y Polinómico (pasajeros por año). *Elaboración propia.*

Año	Ajuste Lineal	Ajuste Logarítmico	Ajuste Exponencial	Ajuste Polinómico
2018	21.542.800	17.016.909	27.191.837	23.420.757
2019	22.867.400	17.886.426	30.521.057	25.475.422
2020	24.192.000	18.755.512	34.257.888	27.628.417
2021	25.516.600	19.624.168	38.452.236	29.879.740
2022	26.841.200	20.492.394	43.160.116	32.229.391
2023	28.165.800	21.360.191	48.444.404	34.677.372
2024	29.490.400	22.227.559	54.375.672	37.223.681
2025	30.815.000	23.094.499	61.033.131	39.868.320
2026	32.139.600	23.961.011	68.505.692	42.611.286
2027	33.464.200	24.827.095	76.893.154	45.452.582
2028	34.788.800	25.692.752	86.307.530	48.392.206
2029	36.113.400	26.557.982	96.874.550	51.430.160
2030	37.438.000	27.422.786	108.735.339	54.566.442

### 4.2.3 Planteamiento de escenarios

Se ha podido comprobar que los ajustes obtenidos aproximan con suficiencia el comportamiento obtenido del tráfico de pasajeros, y que por ello pueden ajustar el comportamiento futuro. Pero el aeropuerto hasta entonces no ha experimentado un cambio significativo en sus instalaciones, tal y como se propone en los próximos

años. Esto dificulta enormemente esta predicción, haciéndola incierta y difusa; partiendo de la base de que el carácter de este tráfico será, sea como sea, creciente.

Por esta razón no se puede sentenciar qué ajuste será el más adecuado para predecir la tendencia. Es por ello que se clasifica este hipotético futuro en tres escenarios de actuación: escenario optimista, pesimista y lógico. Se corresponde con tres enfoques que podrían darse en un futuro a corto-medio plazo.

En un escenario optimista, se puede esperar un gran crecimiento del tráfico aéreo, motivado por la remodelación y ampliación de las instalaciones aeroportuarias. Este escenario se correspondería con el ajuste exponencial.

En un escenario pesimista, se espera que el tráfico crezca de la misma manera que lo ha hecho durante el intervalo de tiempo estudiado. En este caso no se percibiría un aumento del tráfico debido a la nueva pista ni a la nueva terminal. Este escenario se correspondería con el ajuste lineal.

En un escenario lógico, se espera que el tráfico aumente a un mayor ritmo que lo ha hecho antes de la ampliación del aeropuerto, pero de manera controlada y sin alcanzar grandes cotas en un horizonte inferior a los 15 años. Este escenario se correspondería con el ajuste polinómico.

Tabla 4-3. Escenarios Optimista, Lógico y Pesimista de tráfico de pasajeros (pasajeros por año). *Elaboración propia.*

Año	Escenario Optimista Ajuste Exponencial	Escenario Lógico Ajuste Polinómico	Escenario Pesimista- Ajuste Lineal
2012	13.597.920	13.157.669	13.595.200
2013	15.262.774	14.622.361	14.919.800
2014	17.131.465	16.185.383	16.244.400
2015	19.228.947	17.846.733	17.569.000
2016	21.583.234	19.606.412	18.893.600
2017	24.225.767	21.464.420	20.218.200
2018	27.191.837	23.420.757	21.542.800
2019	30.521.057	25.475.422	22.867.400
2020	34.257.888	27.628.417	24.192.000
2021	38.452.236	29.879.740	25.516.600
2022	43.160.116	32.229.391	26.841.200
2023	48.444.404	34.677.372	28.165.800
2024	54.375.672	37.223.681	29.490.400
2025	61.033.131	39.868.320	30.815.000
2026	68.505.692	42.611.286	32.139.600
2027	76.893.154	45.452.582	33.464.200
2028	86.307.530	48.392.206	34.788.800
2029	96.874.550	51.430.160	36.113.400
2030	108.735.339	54.566.442	37.438.000

De manera gráfica, la evolución del crecimiento para cada uno de estos escenarios es mostrada en la figura siguiente:

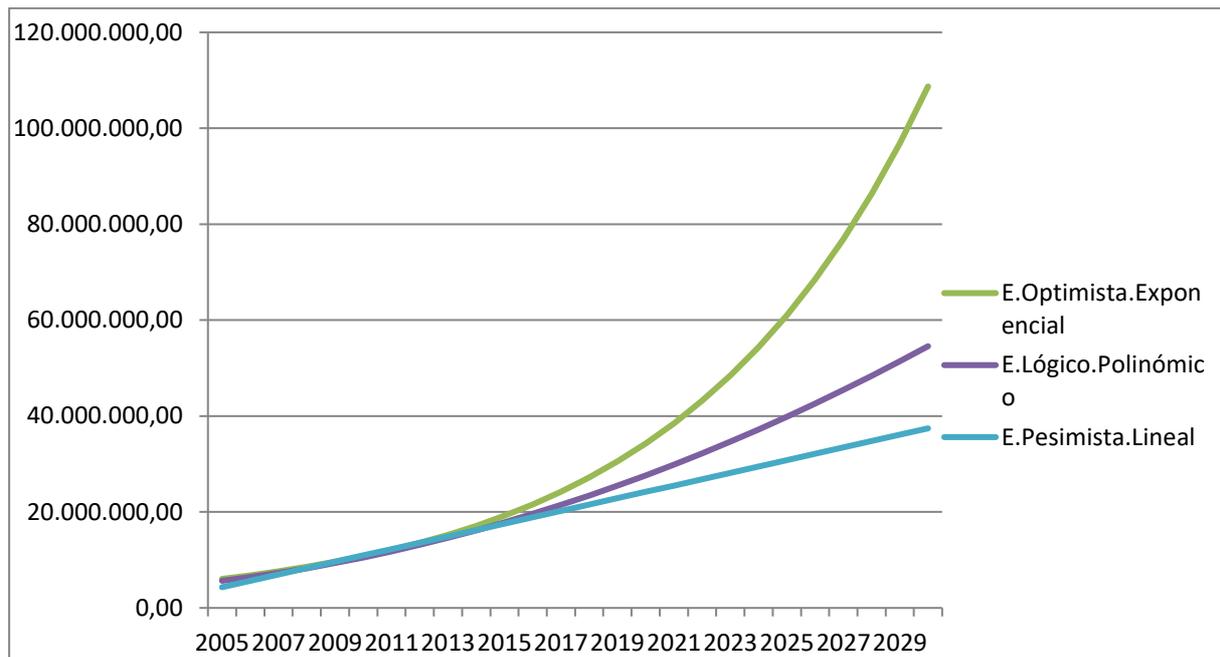


Figura 4-4. Evolución de los escenarios Optimista, Lógico y Pesimista del tráfico de pasajeros (pasajeros por año). *Elaboración propia.*

#### 4.2.4 Elección de escenario

El escenario optimista no parece que sea apropiado, ya que no existe ningún indicio, tanto en el entorno como dentro del propio aeropuerto, de que el tráfico vaya a experimentar un cambio radical que provoque un crecimiento muy superior a los obtenidos hasta ahora. No se espera que un horizonte inferior a 15 años la ampliación del aeropuerto haga que se cuadruple el tráfico de pasajeros actual.

A priori no puede estimarse el efecto inmediato que tendrá la nueva pista de aterrizaje, pero sí se puede saber que será un crecimiento y no de manera lineal, pues la capacidad aeroportuaria podrá hasta ser duplicada. Es por ello que el escenario pesimista se descarta, pues se espera que la ampliación del aeropuerto cause un efecto muy positivo en las operaciones aeroportuarias.

Queda entonces, como escenario más probable, el que se obtiene del ajuste socioeconómico con un modelo polinómico. Estima un crecimiento por debajo del ajuste exponencial, manteniéndose en valores de crecimiento sostenido, mayores que los que estima el ajuste lineal.

Aunque el Ministerio de Transportes y Comunicaciones del país emitió un comunicado en el que se mencionaba que para el año 2021 se esperaba un tráfico de pasajeros que rondaría los 30.9 millones, en el presente proyecto se ha pretendido ser algo más conservador, pues es realmente complicado estimar cuál será exactamente el nivel de tráfico que se alcanzará.

### 4.3 Previsión de Aeronaves

#### 4.3.1 Serie histórica. Tráfico de aeronaves

A continuación, se expondrán los datos obtenidos de previsión de aeronaves, obtenidos de la misma fuente de la que se obtuvo los datos de tráfico de pasajeros. Se considerará el mismo intervalo temporal que anteriormente y se seguirá el mismo análisis.

Se expone en la siguiente tabla la evolución del tráfico de aeronaves en el intervalo temporal 2.005- 2.017:

Tabla 4-4. Serie histórica de tráfico de aeronaves (número de operaciones por año y porcentaje de crecimiento). *Elaboración propia.*

Año	Total comercial	Crecimiento [%]
2005	73.300	-
2006	77.300	5.4
2007	92.900	20.2
2008	98.700	6.2
2009	105.000	6.4
2010	120.000	14.3
2011	135.000	12.5
2012	148.300	9.8
2013	153.100	3.2
2014	155.100	1.3
2015	166.400	7.3
2016	176.870	6.3
2017	186.826	5.6

#### 4.3.2 Planteamiento de escenarios

Los escenarios que van a ser planteados siguen el mismo criterio que los que ya se plantearon para la previsión de tráfico de pasajeros: Optimista, Pesimista y Lógico.

De nuevo se cuenta con un ajuste exponencial que prevee un gran crecimiento del tráfico de aeronaves en los próximos años. Este crecimiento exponencial se asemeja a un escenario optimista en que la ampliación del aeropuerto hará que se quintuplique el número de movimientos del aeropuerto por año.

Como escenario pesimista se tiene el correspondiente al ajuste polinómico. Debido a esa irregularidad acentuada de crecimiento en los datos anteriores a 2018, este ajuste cuenta con una clara tendencia a la estancamiento del crecimiento en un futuro, llegando a alcanzar un valor máximo a partir del cual no se produce un mayor crecimiento.

Por último, como escenario lógico se cuenta con aquel caso intermedio entre el gran crecimiento exponencial y el futuro declive del tráfico previsto por el ajuste polinómico: el ajuste lineal.

En la siguiente tabla se exponen los valores de tráfico previstos hasta el año 2030 para los distintos escenarios.

Tabla 4-5. Escenarios Optimista, Lógico y Pesimista de tráfico de aeronaves (número de operaciones por año).  
*Elaboración propia.*

Año	Escenario Optimista Ajuste Exponencial	Escenario Pesimista Ajuste Polinómico	Escenario Lógico o Medio Ajuste Lineal
2012	128.320	144.301	139.199
2013	139.007	153.022	148.614
2014	150.585	161.397	158.029
2015	163.127	169.424	167.445
2016	176.713	177.104	176.860
2017	191.431	184.436	186.276
2018	207.375	191.422	195.691
2019	224.646	198.061	205.107
2020	243.357	204.352	214.522
2021	263.625	210.296	223.938
2022	285.582	215.893	233.353
2023	309.367	221.143	242.768
2024	335.133	226.046	252.184
2025	363.046	230.601	261.599
2026	393.283	234.810	271.015
2027	426.038	238.671	280.430
2028	461.522	242.185	289.846
2029	499.960	245.352	299.261
2030	541.601	248.172	308.677

Puede observarse que dentro del escenario Lógico se prevé que el tráfico casi se triplique para el año 2030, no llegue a duplicarse en el escenario pesimista y se cuadriplique en el escenario optimista.

De manera gráfica, la evolución del tráfico para los distintos escenarios quedaría representado de la siguiente manera.

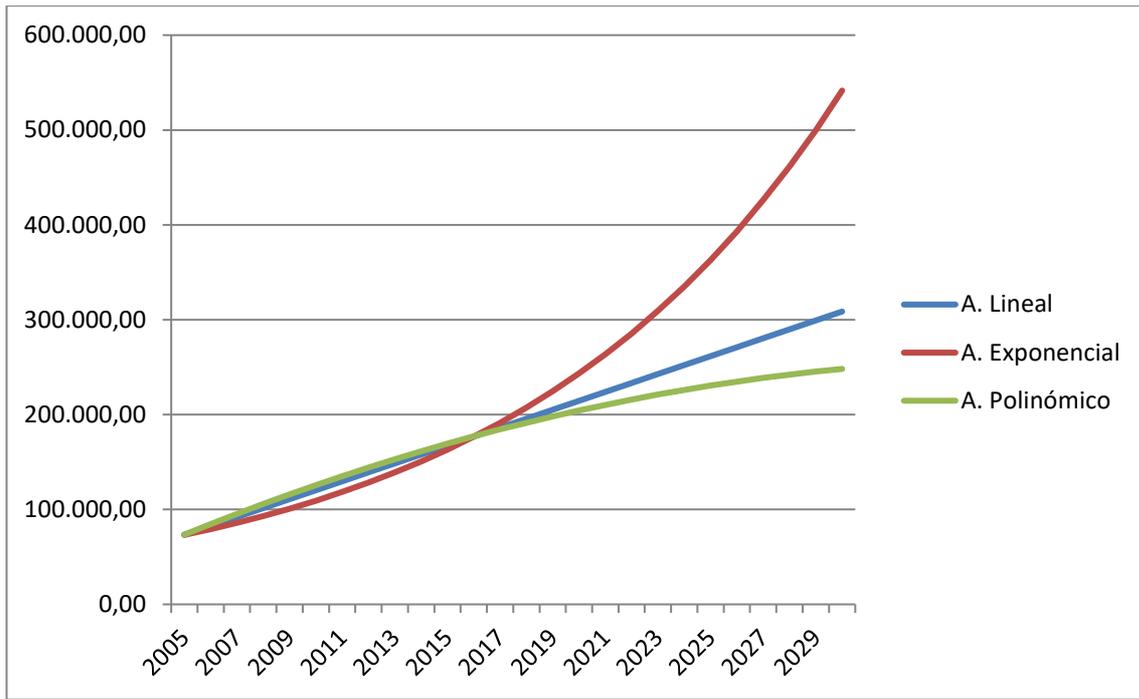


Figura 4-5. Evolución de los escenarios Optimista, Lógico y Pesimista del tráfico de aeronaves (número de tráficos por año). *Elaboración propia.*

Puede apreciarse gráficamente cómo, dentro del ajuste polinómico, se da una clara tendencia asintótica en el entorno de los 250.000 movimientos, mientras que para el resto de los ajustes se obtiene una tendencia creciente del mismo.

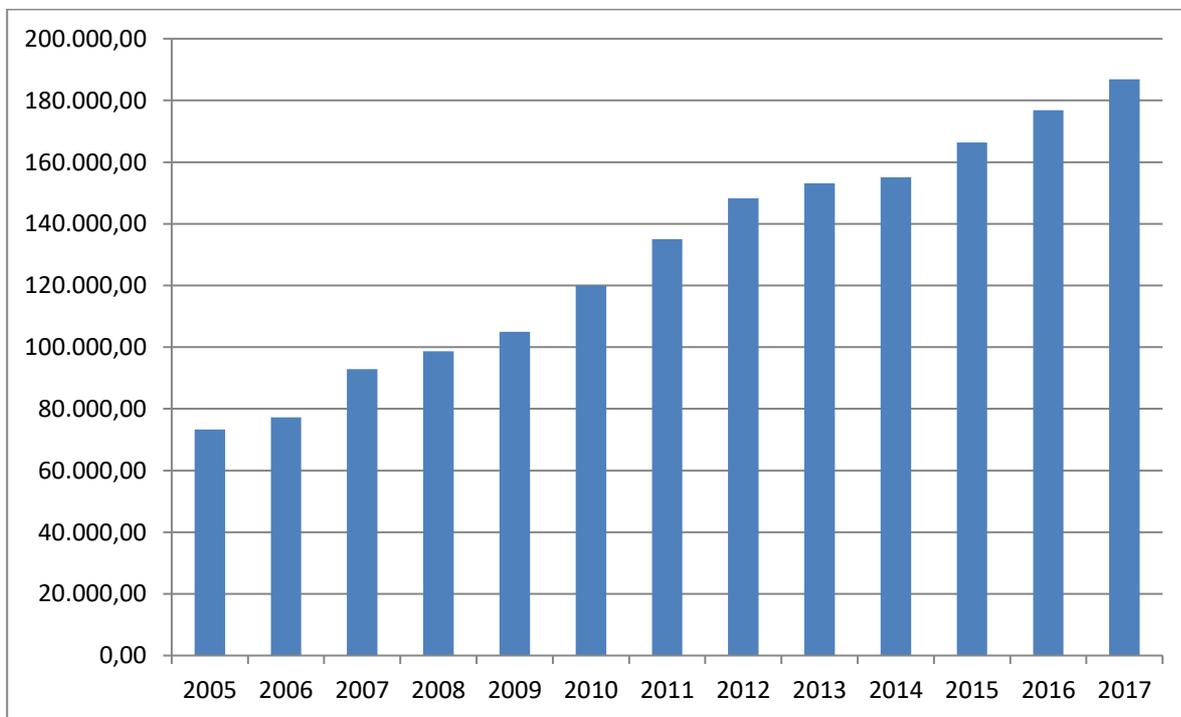


Figura 4-6. Serie histórica de tráfico de aeronaves (número de operaciones por año). *Elaboración propia.*

Al igual que se obtuvo un crecimiento en el tráfico de pasajeros, es lógico que vaya acompañado de un

crecimiento de aeronaves, aunque no del mismo carácter. Si se compara los datos de crecimiento, los valores obtenidos para el tráfico de pasajeros eran superiores en crecimiento con respecto al tráfico de aeronaves, traduciéndose en un aumento de la ocupación media de las mismas.

Se empleará el mismo método para la obtención de la tendencia de crecimiento del volumen de tráfico de aeronaves, ajustando de manera lineal, parabólica, exponencial y logarítmica. Nuevamente esto servirá para prever ese previsible crecimiento, seleccionando un ajuste adecuado que más se acerque al comportamiento real que se espera.

- Ajuste Lineal

$$y = 9707,2 \cdot x - 2 \cdot 10^7 \rightarrow R^2 = 0.9886$$

- Ajuste Parabólico

$$y = -95.234 \cdot x^2 + 392737x - 4 \cdot 10^8 \rightarrow R^2 = 0.9896$$

- Ajuste Exponencial

$$y = 9 \cdot 10^{-65} \cdot e^{0.0792 \cdot x} \rightarrow R^2 = 0.9678$$

- Ajuste Logarítmico

$$y = 2 \cdot 10^7 \ln(x) - 10^8 \rightarrow R^2 = 0.9886$$

De nuevo se observa que los modelos se ajustan bien al espectro de datos facilitados por el explotador aeroportuario, traduciéndose en unos valores del coeficiente próximos a la unidad. Esto hace que no se rechace ningún ajuste a priori, sino que los cuatro son igualmente válidos en el aspecto matemático. Los valores de tráfico de aeronaves para cada ajuste se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 4–6. Predicción de tráfico de aeronaves para los ajustes Lineal, Logarítmico, Exponencial y Polinómico (número de operaciones por año). *Elaboración propia.*

Año	Ajuste Lineal	Ajuste Logarítmico	Ajuste Exponencial	Ajuste Polinómico
2018	195.691	195.640	207.375	191.422
2019	205.107	205.018	224.646	198.061
2020	214.522	214.391	243.357	204.352
2021	223.938	223.760	263.625	210.296
2022	233.353	233.124	285.582	215.893
2023	242.768	242.484	309.367	221.143
2024	252.184	251.839	335.133	226.046
2025	261.599	261.189	363.046	230.601
2026	271.015	270.535	393.283	234.810
2027	280.430	279.876	426.038	238.671
2028	289.846	289.212	461.522	242.185
2029	299.261	298.544	499.960	245.352
2030	308.677	307.872	541.601	248.172

### 4.3.3 Elección de escenario

Con la ampliación del aeropuerto, la creación de la nueva terminal y la nueva pista, se espera que el movimiento de aeronaves sea acorde al crecimiento que se espera de pasajeros. Por esta misma razón, se descarta el escenario pesimista.

De nuevo parece descabellado afirmar que el tráfico de aeronaves crezca exponencialmente en los próximos años, aun considerando la ampliación del aeropuerto. Todos los proyectos llevan un tiempo de adaptación a los nuevos escenarios y los resultados de crecimiento no serán inmediatos, o al menos en un intervalo de tiempo inferior a 15 años.

Resulta entonces que el escenario lógico que se asemeja a un ajuste lineal sea lo más adecuado a considerar. Se espera un crecimiento sostenido de aeronaves, acompañado por los nuevos destinos y nuevas rutas que se facilitarán debido a la creciente capacidad con la que contará el aeropuerto Jorge Chávez en poco tiempo.

La elección del escenario y el número de movimientos que se esperan resulta crucial para poder diseñar un paquete de firme que soporte las cargas generadas por la cantidad de aeronaves en el futuro. Pero, además del número de aeronaves, será importante conocer además qué modelos serán los que adquieren mayor importancia actualmente en el aeropuerto y los que se esperan que la adquieran en un futuro próximo.

### 4.3.4 Previsión de tráfico de aeronaves según modelo.

Resulta importante conocer cuáles son los modelos de aeronaves que van a ser los principales protagonistas del crecimiento que se prevee que ocurra en el tráfico dentro del aeropuerto, con el objetivo de dimensionar los nuevos puestos de estacionamiento lo más eficiente posible, satisfaciendo las necesidades del nuevo aeropuerto internacional Jorge Chávez.

Además de para conocer cuáles serán los modelos de estacionamientos necesarios para absorber esa demanda de aeronaves, también es útil para dimensionar la red de calles de rodaje y las características de las mismas, las cuáles serán las encargadas de dar servicio a dichos puestos. La importancia de un modelo u otro de aeronave reside principalmente en el alcance que se pretenda cubrir y en las características de la carga de pago. A continuación, se exponen los datos facilitados por el explotador aeroportuario en cuanto a tipo de tráfico:

Tabla 4–7. Serie histórica de tráfico de según el tipo (número de pasajeros y porcentaje de crecimiento para cada año). *Fuente: lima-airport.com. Elaboración propia.*

Año	Nacional	Internacional	Tránsito	Total	Crecimiento
2012	6.900.385	5.203.544	1.226.712	13.330.641	13
2013	7.914.742	5.755.120	1.238.980	14.908.772	11.8
2014	8.479.267	5.858.319	1.331.045	15.668.631	5.1
2015	9.479.821	6.239.110	1.393.605	17.112.536	9.2
2016	10.437.343	8.400.864	1.878.145	20.726.352	21.1
2017	11.354.977	9.252.466	2.066.686	22.674.129	9.4

- Tráfico nacional: 52.33 % del total.
- Tráfico internacional: 38.5 % del total.
- Otras clases de tráfico: 9.17 % del total.

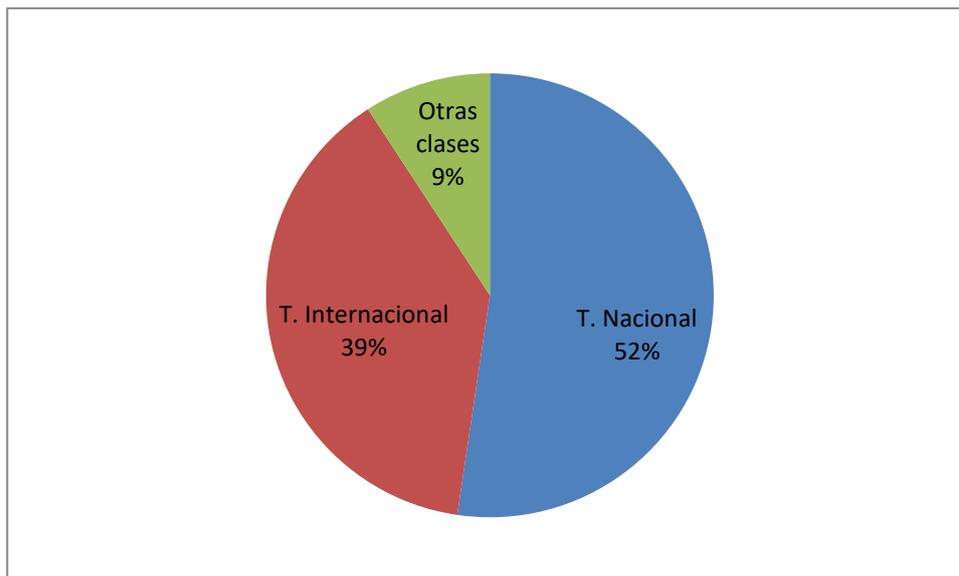


Figura 4-7. Serie histórica de tráfico según el tipo. *Elaboración propia.*

Puede apreciarse cómo el transporte nacional adquiere mayor importancia dentro de los movimientos de las aeronaves, seguido de cerca por el transporte internacional. A diferencia de otros aeropuertos de la región, el aeropuerto internacional Jorge Chávez supone el principal foco de entrada y salida de tráfico de todo el país, lo que se traduce en que la mayoría del transporte internacional que tiene lugar en el aeropuerto es de largo alcance, por encima de cualquier otro aeropuerto del país. De cara a saber cuál es el modelo de aeronaves empleado, este dato resulta interesante, pues las aeronaves que hacen un uso más frecuente del lado aire del aeropuerto resultan ser aeronaves de corto a medio alcance, donde modelos como el Airbus A320 y el Boeing 737 son los más influyentes. Además de esto, en transporte internacional también es ampliamente usado, pues los transportes entre países vecinos de América Latina se cubren con estos modelos mayoritariamente.

En la siguiente tabla se recoge el tráfico durante el año 2017 clasificado en función del modelo de aeronave.

Tabla 4–8. Movimientos de aeronaves en 2017 clasificado en función del tipo (número de operaciones y porcentaje del total para cada modelo). *Fuente: lima-airport.com. Elaboración propia.*

Modelo	Total	Porcentaje
Boeing 737-800 (Winglets) Pass	36.189	19 %
Airbus A320 Passenger	26.643	14 %
Airbus A319	18.091	9.6 %
Airbus A321	14.771	7.9 %
Bombardier Regional JET-1000	14.623	7.8 %
Airbus A320 (Sharklets)	12.131	6.5 %
Embraer ERJ-195, Legancy 1000	9.112	4.8 %
Airbus A330-200	7.407	3.9 %
Aerospatale ATR-72	5.914	3.1 %
Boeing 787-8	3.987	2.1 %
Airbus A340-600	3.675	1.9 %
Airbus A330-300	3.456	1.8 %
TOTAL	186.826	100 %

Como se comentó anteriormente, los modelos de aeronaves con más relevancia dentro del panorama del tráfico aéreo del aeropuerto son el Airbus A320 y el Boeing 737. Es de esperar que estas aeronaves sigan siendo las protagonistas en el futuro, pues son y seguirán siendo en un futuro a corto y medio plazo los modelos más vendidos de sus fabricantes.

Se realizará la hipótesis de que el crecimiento de las operaciones del modelo de aeronaves seguirá la misma tendencia que el crecimiento de las operaciones dentro del aeropuerto. Existen muchas incógnitas acerca de cuál será la aeronave más empleada en cubrir las nuevas rutas que se abrirán para este aeropuerto, sin contar con los nuevos modelos de aeronaves que aparecerán, pero a efectos de diseño de plataforma, no se espera un cambio radical en las características de las aeronaves tales como envergadura, peso, tren de aterrizaje...

Tabla 4–9. Previsión de movimiento de aeronaves según el tipo (número de movimientos de aeronaves para cada modelo). *Elaboración propia.*

Modelo	Tráfico en 2017	Tráfico en 2024	Tráfico en 2030
Boeing 737-800 (Winglets) Pass	36.189	48.855	59.965
Airbus A320 Passenger	26.643	35.968	44.147
Airbus A319	18.091	24.422	29.976
Airbus A321	14.771	19.940	24.475
Bombardier Regional JET-1000	14.623	19.741	24.230
Airbus A320 (Sharklets)	12.131	16.376	20.101
Embraer ERJ-195, Legacy 1000	9.112	12.301	15.098
Airbus A330-200	7.407	9.999	12.273
Aerospatiale ATR- 72	5.914	7.983	9.799
Boeing 787-8	3.987	5.382	6.606
Airbus A340-600	3.675	4.961	6.089
Airbus A330-300	3.456	4.665	5.726
TOTAL	186.826	252.584	308.677

En la tabla anterior no se ha tenido en cuenta un concepto, que es el de la inclusión de los nuevos modelos de aeronaves que se esperan que surjan en un intervalo corto de tiempo. Aeropuertos internacionales como el Jorge Chávez son principales receptores de las aeronaves más modernas del momento. Pero, al igual que es muy complicado estimar exactamente el impacto que tendrá la ampliación del aeropuerto, resulta complicado estimar el impacto de estas nuevas aeronaves.

Actualmente, modelos como el A350, que ya se está empezando a emplear en distancias largas, no se recogen en las previsiones de movimiento de aeronaves, aunque se espera que tendrá gran importancia en el tráfico aéreo mundial del futuro. El aeropuerto Jorge Chávez no será ajeno a esto y recibirá un creciente tráfico de estos modelos que, para los cuales, se debe contar con unas instalaciones que satisfagan esas necesidades. Por ello, se considerará un número de movimientos mínimo y un número de estacionamientos adaptados para aeronaves de esas características.



## 5 DISEÑO GEOMÉTRICO

**E**n este capítulo se va a realizar el diseño de una plataforma de estacionamiento, estableciendo como límites la nueva terminal proyectada y las nuevas calles de rodaje que dan servicio a esta y a la nueva pista de aterrizaje.

Para un correcto dimensionamiento, ya se ha mostrado con anterioridad cuáles son las previsiones de movimiento de aeronaves que se esperan alcanzar en el aeropuerto, y cuáles serán los modelos más empleados para cubrir esa demanda. Con esto ya se cuenta con las bases para dimensionar tanto zonas de rodaje como puestos de estacionamiento.

Se comenzará con un análisis de la capacidad actual con la que cuenta el aeropuerto y las zonas disponibles para ejecutar las plataformas de estacionamiento. Conociendo la capacidad actual, se pone de manifiesto las necesidades reales a cubrir y, por tanto, los diseños acordes al espacio disponible.

Como bien se sabe, cada avión cuenta con unas actuaciones distintas, tanto en tierra como en vuelo. Características como la envergadura, longitud, peso y radios de maniobra serán empleados para dimensionar el campo de vuelo acorde a estas características.

Los espacios disponibles con los que se cuenta para proyectar estas plataformas son las parcelas que se encuentran entre las dos calles de rodaje paralelas a las pistas –una existente y otra proyectada–, dos calles de rodaje paralelas entre sí que conectan dichas calles paralelas a la pista, la zona dedicada a la terminal y a los puestos de estacionamiento de vehículos y viales de servicio, la nueva torre de control proyectada y la nueva estación de rescate, proyectada junto a la torre. Con todo esto, se pueden diferenciar claramente 3 zonas en las que es posible el emplazamiento de los nuevos puestos de estacionamiento.

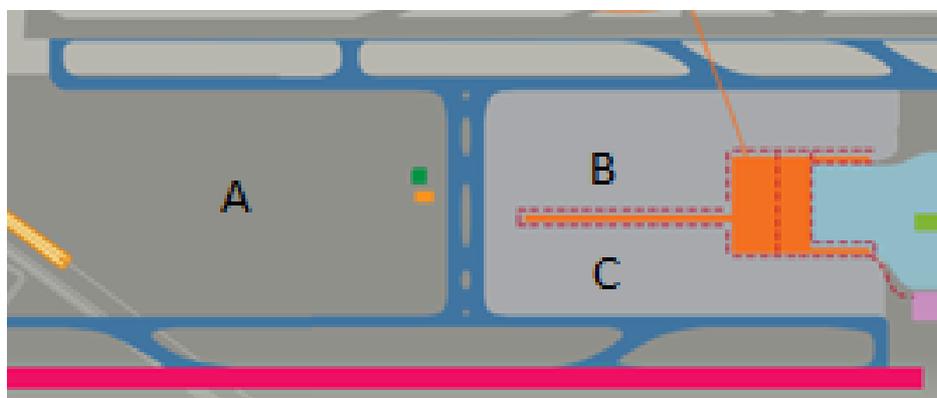


Figura 5-1. Parcelas disponibles para la ejecución de las plataformas. *Fuente: lima-airport.com*

- Zona A. Limitada por las calles de rodaje paralelas a las pistas al norte y al sur, y al este por las calles de rodaje que conectan a las primeras y por la torre y la estación de rescate. Se plantea este entorno

como una plataforma de estacionamiento de aeronaves en remoto, alejado de ambas terminales.

- Zona B. Limitada al norte por la calle de rodaje paralela a la pista existente, al sur por la terminal y el muelle de carga y al oeste por las calles que conectan a las calles de rodaje paralelas. Esta plataforma podría dar servicio a aeronaves tanto para estacionamiento en remoto como estacionamiento conectado por pasarela al muelle de carga o a la propia terminal. La superficie disponible en esta zona es de 369.839 m<sup>2</sup>.
- Zona C. Limitada al norte por el muelle de carga y la terminal, al oeste por las calles que conectan a las calles de rodaje paralelas a las pistas y al sur por la calle de rodaje paralela a la pista proyectada. Esta plataforma, al igual que la de la zona B, podría dar servicio tanto para estacionamiento en remoto como asistido por pasarela. La superficie disponible en esta zona es de 301.528 m<sup>2</sup>.

Esto supone un total de 671.367 m<sup>2</sup> sin contar con la zona de estacionamiento en remoto que, dependiendo de la configuración proyectada en las parcelas colindantes a la terminal, se proyectarán puestos de estacionamiento en remoto o no.

La prioridad principal es la de proyectar los puestos de estacionamiento entre las zonas B y C, no teniendo que hacer uso de la zona A, dejando esta zona libre para futuras ampliaciones y edificaciones.

## 5.1 Aeronaves usuarias y tipos de puestos de estacionamiento

En el capítulo anterior se expuso una relación de las aeronaves que operaban en el aeropuerto Jorge Chávez, destacando por encima de todas los modelos B737 y A320, abarcando entre los dos casi el 40% de los movimientos.

Para saber cuáles son las características de las aeronaves usuarias, se debe acudir a los manuales de operaciones y estructurales de los distintos modelos. Es en estos manuales donde se recoge la totalidad de las características tanto físicas como operativas de las aeronaves, y suponen una fuente de información fiable para recopilar.

Tabla 5–1. Características de las aeronaves. *Fuente: manuales de fabricantes.*

Aeronave	Longitud [m]	Envergadura [m]	MTOW [kg]
B747, A380	76.4 / 79.4	68.5 / 79.75	440.000 / 590.000
A330	40.8	60.3	233.000
B767-300, B757-300	54.9 / 54.47	47.6 / 38.05	186.880 / 123.600
B757-200	47.32	38.05	115.680
B727, MD82	46.7 / 45.1	32.9 / 32.8	95.028 / 67.812
B737-800, A320	39.5 / 37.6	35.7 / 34.1	79.000 / 78.000
CRJ-900	36.4	24.85	42.070
ATR-72, ATR-42	27.16 / 22.67	27.05 / 24.57	22.800 / 18.600

La Normativa en este caso recoge una serie de puestos de estacionamiento con el fin de estandarizar la geometría de estos en todos los aeropuertos. Estos puestos cuentan con la forma de la siguiente figura, variando principalmente en la longitud y la anchura, dispuestos de tal manera que cubran las necesidades de longitud y envergadura de las aeronaves que los van a emplear.

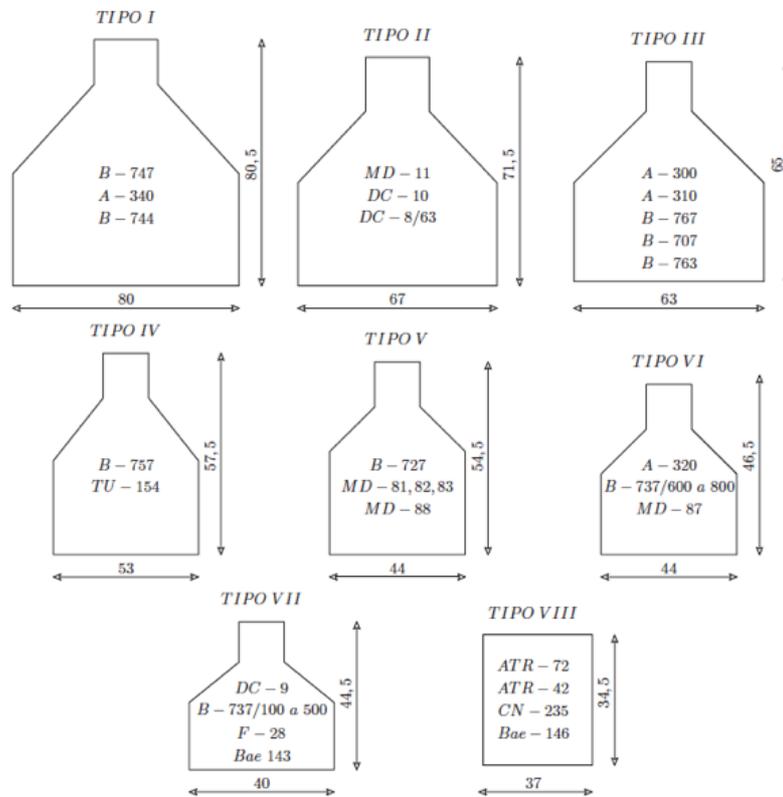


Figura 5-2. Tipos de puestos de estacionamiento. Fuente: OACI.

En la siguiente tabla se recogen las medidas de los puestos mostrados en la figura anterior.

Tabla 5-2. Características de los tipos de puestos de estacionamiento.

Tipo de puesto	Aeronaves usuarias	Longitud [m]	Anchura [m]	Superficie [m <sup>2</sup> ]
I	B747, A380	80.5	80	6.440
II	A330	71.5	67	4.790,5
III	B767-300, B757-300	65	63	4.095
IV	B757-200	57.5	53	3.047,5
V	B727, MD82	54.5	44	2.398
VI	B737-800, A320	46.5	44	2.046
VII	CRJ-900	44.5	40	1.780
VIII	ATR-72, ATR-42	34.5	37	1.276,5

Además de esto, el Anexo 14 de OACI recoge una serie de distancias mínimas entre los puestos de estacionamiento y cualquier obstáculo adyacente, a saber:

Tabla 5–3. Márgenes de separación en los puestos de estacionamiento de aeronaves. *Fuente: Anexo 14 de OACI.*

Letra de Clave	Margen [m]
A	3
B	3
C	4.5
D	7.5
E	7.5
F	7.5

El aeropuerto Jorge Chávez es de clave D, por lo que separación a considerar es de 7.5 m. También la Norma abre la posibilidad de que los márgenes pueden reducirse en los puestos de estacionamiento de aeronaves con la proa hacia adentro, cuando la letra de clave sea D, E o F, que es el caso del presente aeropuerto.

Desde el punto de vista constructivo la Norma recoge recomendaciones con respecto a la resistencia de la plataforma y a las pendientes. En el caso de la resistencia, en el Anexo a la presente memoria se recoge el cálculo del paquete de firme, el cual garantiza que el pavimento diseñado puede soportar el tránsito de las aeronaves que van a utilizar la plataforma. Además de esto, el cálculo tiene en cuenta que algunas partes de la plataforma estarán sometidas a mayor intensidad de tránsito y mayores esfuerzos que la propia pista, pues el movimiento en estas zonas es más lento o incluso situación estacionaria, donde el pavimento debe resistir cargas estáticas. Para el caso de las pendientes, el firme debe ejecutarse teniendo en cuenta las recomendaciones de la Norma:

- Las pendientes deben ser suficientes para impedir la acumulación de agua en la superficie, manteniendo los valores más bajos de los requisitos de drenaje.
- En el propio puesto de estacionamiento, la pendiente no deberá superar el 1%.

Una vez expuestos los tipos de puestos de estacionamiento que existen, se va a proceder a analizar cuál es el número óptimo de los mismos y su distribución dentro de la zona disponible para ello. No deja de ser un problema de optimización, sujeto a los siguientes condicionantes:

- Espacio limitado de puestos de estacionamiento en contacto con la terminal. No todos los puestos de estacionamiento se encontrarán conectados mediante pasarela a la terminal, por eso resulta necesario un conocimiento de qué modelos de aeronaves son los más adecuados para ocupar estas posiciones.
- Espacio limitado de plataforma. Existen 3 zonas para proyectar plataformas de estacionamiento, 2 aledañas a la terminal y otra zona alejada junto a la nueva torre de control proyectada. Con un total de 671.367 m<sup>2</sup> más la zona de estacionamiento en remoto, se cuenta con una gran zona para poder proyectar los puestos de estacionamiento necesarios.
- Accesibilidad a los puestos diseñados. Las calles de rodaje, las entradas y las zonas libres deben cumplir los márgenes de seguridad que protegen el movimiento de las aeronaves, además de que deben contar con una disposición viable para este movimiento, sin poner en peligro a la aeronave en movimiento ni a las demás.
- Número de puestos de estacionamiento que cubran la demanda esperada de tráfico que se espera en el aeropuerto en los próximos años.

Analizando detenidamente toda la información que se ha recogido anteriormente, se procede a justificar el diseño de la plataforma de estacionamiento que se pretende proyectar.

En la siguiente tabla se recoge los datos del número de operaciones actuales junto con los puestos de estacionamiento actuales.

Tabla 5-4. Operaciones de las aeronaves usuarias durante 2017 y puestos de estacionamiento. *Fuentes: AIP y lima-airport.com.*

Tipo de puesto	Aeronaves usuarias	Operaciones 2017	Puestos de estacionamiento
I	B747, A380	1.002	3
II	A330	10.863	3
III	B767-300, B757-300	28.703	20
IV	B757-200	253	2
V	B727, MD82	50	1
VI	B737-800, A320	91.528	22
VII	CRJ-900	2.244	1
VIII	ATR-72, ATR-42	6.537	3

La tabla anterior pone de manifiesto que el número de operaciones –aproximadamente la mitad llegadas- hace que los puestos de estacionamiento estén próximos a la saturación. Tomando como ejemplo el puesto VI, el cual recoge las aeronaves que mayor número de operaciones tienen en el aeropuerto, suponiendo el 50 % de operaciones en llegadas repartidas a lo largo de un año, se obtiene de media 125 llegadas de aeronave al día, para 22 puestos de estacionamiento. Dado el caso de que muchas aeronaves que llegan permanecen en el puesto un tiempo concreto, sin abandonarlo inmediatamente, se antoja un número de puestos bastante reducidos para las previsiones de aeronaves que se tienen con el proyecto de la nueva pista y la nueva terminal.

Por esta razón, se plantea la necesidad de aumentar el número de puestos de estacionamiento aprovechando al máximo el área disponible y seleccionando estos de manera lógica para absorber el creciente tráfico de aeronaves en el medio-largo plazo.

Atendiendo a la tabla 3-6, se prevé que el tráfico de aeronaves llegue a casi duplicarse con respecto a los datos obtenidos en 2017, por lo que una solución conservadora desde el punto de vista del abastecimiento de las necesidades de la plataforma sería la de duplicar también el número de puestos de estacionamiento, pero esto no sería una solución del todo acertada.

Queda claro que el mundo de la aeronáutica es un mundo en constante evolución y las aeronaves que se emplean en estos momentos en cubrir las rutas de medio a largo alcance serán sustituidas por nuevos modelos más eficientes, en los que para una misma cantidad de combustible, o incluso menor, se logre aumentar el alcance, reduciéndose además peso y aumentándose la tecnología embarcada. No se puede vaticinar cómo serán esos nuevos modelos, ni sus dimensiones ni todas aquellas características que sean susceptibles de ser modificadas, pero sí puede asegurarse una cosa. Las aeronaves de medio alcance, como los modelos del Airbus A321 o el Boeing 737, tendrán unas características muy similares a las que tienen actualmente, debido al hecho de que son las aeronaves más vendidas de sus respectivos fabricantes y las más versátiles.

Aeronaves de largo alcance, en cambio, sí son más susceptibles de ser sustituidas por modelos nuevos. Recientemente ha saltado la noticia de que cancelan la fabricación del A380, la aeronave comercial más grande, siendo sustituida principalmente por el A350. En este sentido, parece que el estado a largo plazo parece un poco más difuso para aeronaves de largo alcance que para aeronaves de medio alcance.

Por estas razones, la idea del diseño geométrico se enfocará en reforzar el número de puestos de aeronaves de medio alcance sobre todo, puestos cerca de la saturación y que se espera que con un incremento importante se consiga amortiguar ese crecimiento en la demanda. También se diseñará nuevos puestos para aviones de largo alcance, prestando especial atención a puestos relacionados con la nueva aeronave A350, llamada a liderar las rutas de largo alcance. En cuanto a los puestos de aeronaves de transporte regional, cuentan con una importancia

clave en países de Latino América y, por ello, también se optará por reforzar el número de puestos de estos modelos.

Atendiendo al número y tipo de puestos actuales en el aeropuerto y, cruzando estos datos con las previsiones de crecimiento de tráfico en el aeropuerto en los próximos años, parece claro que los claros puestos a reforzar serán los del tipo VI, pues son los destinados a abastecer a casi el 40 % de los tráficos futuros, y los de tipo I y II, que son las aeronaves de gran alcance que llegarán a formar parte del panorama aeroportuario con mayor importancia en los próximos años.

Por último, es necesario realizar la siguiente aclaración que ha sido importante a la hora del dimensionamiento de los puestos de estacionamiento. Actualmente, como ya se sabe, una única pista es la que se encarga de abastecer todos los tráficos que se producen en el aeropuerto, y estos a su vez cuentan con una sola plataforma de estacionamiento. En cambio, con la ejecución de la ampliación del aeropuerto, se pasará a tener disponible 2 pistas independientes entre sí, y dos plataformas de estacionamiento de aeronaves, una existente y otra que se está diseñando. Esto hace posible que pueda organizarse el tráfico según el tipo de aeronave, a saber:

- La actual pista, que pasará a denominarse 15R/33L, absorberá gran parte de las aeronaves de corto y medio alcance, abriendo también la posibilidad del empleo de esta por parte de aeronaves más pesadas. Se considerará que el 80 % del tráfico que se de en esta pista tendrá como destino de estacionamiento la actual plataforma.
- La nueva pista, 15L/33R, será preferente para las aeronaves pesadas, dejando la posibilidad de uso por parte de aeronaves de corto y medio radio. El 100 % de las operaciones que se den en esta pista tendrán como destino de estacionamiento la nueva terminal.

En resumen, la nueva plataforma deberá contar con el número de puestos necesarios para absorber el 20 % de los tráficos de la pista 15R/33L y el 100 % de los tráficos de la pista 15L/33R.

En la siguiente tabla se recogen los puestos que se contempla:

Tabla 5-5. Serie histórica (número de puestos de estacionamiento para cada modelo disponibles). Tráfico de aeronaves.

Tipo de puesto	Aeronaves usuarias	Puestos Actuales	Puestos diseñados	Puestos totales
I	B747, A380, A350*	3	10	13
II	A330	3	10	13
III	B767-300, B757-300	20	4	24
IV	B757-200	2	0	2
V	B727, MD82	1	0	1
VI	B737-800, A320	22	26	48
VII	CRJ-900	1	12	13
VIII	ATR-72, ATR-42	3	12	15
TOTAL	-	55	74	129

No existe un tipo de estacionamiento en el que se enmarque la aeronave A350. Cuenta con una longitud y una envergadura superior a las del A330, por lo que se ha considerado que el puesto tipo I es el adecuado para este modelo.

En total, existen 36 puestos de estacionamiento ejecutados, pero son capaces de dar servicio a los tipos de aeronaves recogidas en la tabla anterior. Los puestos de estacionamiento más grandes son capaces de albergar a las aeronaves de menor envergadura, pero es necesario restringir su uso por motivos de operatividad de la plataforma. Por ello, los puestos de estacionamiento más grandes están restringidos únicamente al uso por parte de las aeronaves de gran tamaño. Igualmente pasa con los puestos en contacto distintos a los de gran envergadura. Estos se reservarán para el uso por parte únicamente de los usuarios de aeronaves del tipo VI.

Se ha aumentado considerablemente el número de puestos de estacionamiento del tipo VI, apostando claramente

por esta tendencia creciente de esos modelos de aeronaves en concreto. No se tienen en cuenta los puestos IV y V, relacionados con aeronaves que no cuentan actualmente, y no se espera que lo haga, con importancia dentro del tráfico aeroportuario. Puestos como el VII y VIII, destinados a aeronaves de transporte regional, suelen situarse como puestos de estacionamiento en remoto, por lo que la creación de los 5 puestos en total (2 para el tipo VII y 3 para el tipo VIII) podrían ejecutarse lejos de la nueva terminal de pasajeros.

## 5.2 Distribución dentro del campo de vuelo

Como se ha comentado al inicio del capítulo, la preferencia de ocupación de la plataforma será la de las zonas que se encuentran aledañas a la terminal. En este caso, el área disponible para la ejecución de la plataforma es capaz de abarcar un área en la que podría incluirse la totalidad de los puestos de estacionamiento, y de las calles de acceso a dichos puestos. Con esto, la zona que queda al otro lado de la calle de rodaje que conecta ambas pistas se deja para la colocación de la nueva torre de control proyectada, y todos lo demás libre para futuros usos y necesidades del aeropuerto.

Con todo esto, se tendrán puestos en contacto con la terminal a través del muelle de carga contemplado en los planos y fotografías de la nueva terminal, y puestos remotos que se encuentran en las cercanías de los anteriores.

A la hora de la selección de las zonas en las que se ejecutarán los puestos de estacionamiento, se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se ha partido de la base de abastecer las necesidades de los tráficos futuros que se esperan que se den en el aeropuerto Jorge Chávez. Por ello, se ha considerado en los puntos anteriores un número de puestos de estacionamiento que ayuden a mantener la Capacidad del campo de vuelo con la inclusión de la nueva pista de aterrizaje proyectada.
- En base a la importancia de los modelos de aeronaves, es decir, de acuerdo con aquellos modelos que más peso tendrán en el futuro, se le asigna una zona prioritaria dentro del campo de vuelo. Estas zonas prioritarias se caracterizan por contar con una mayor facilidad a la hora de acceder a los puestos de estacionamiento, y también por el recorrido de los pasajeros dentro de la terminal.
- Los puestos de estacionamiento relativos a las aeronaves de mayor capacidad se ha decidido colocarlos en las cercanías del núcleo de la terminal. Esto se ha considerado de esta manera porque estas aeronaves aportarán a la terminal un gran número de pasajeros, los cuales en el caso en el que tengan que recorrer grandes distancias dentro de las instalaciones aeroportuarias, ayudarán a incrementar la congestión dentro de las mismas.
- Además de esto, se ha empleado al máximo el concepto de funcionalidad. Cada puesto de estacionamiento cuenta con un estacionamiento prioritario, es decir, un modelo de aeronave prioritario para el estacionamiento. De esta manera, los puestos de estacionamiento más grandes serán capaces de dar servicio al resto de los modelos, más pequeños, pero que en el caso de que resulte necesario su empleo por parte de una aeronave de grandes dimensiones, se le dará prioridad.
- Los puestos de estacionamiento considerados se encargarán de dar servicio al 20 % de los tráficos que se dan en la pista actual, y al 100 % de los tráficos de la nueva pista.

Con esta serie de puntos, se procede a realizar la distribución de los puestos de estacionamiento.

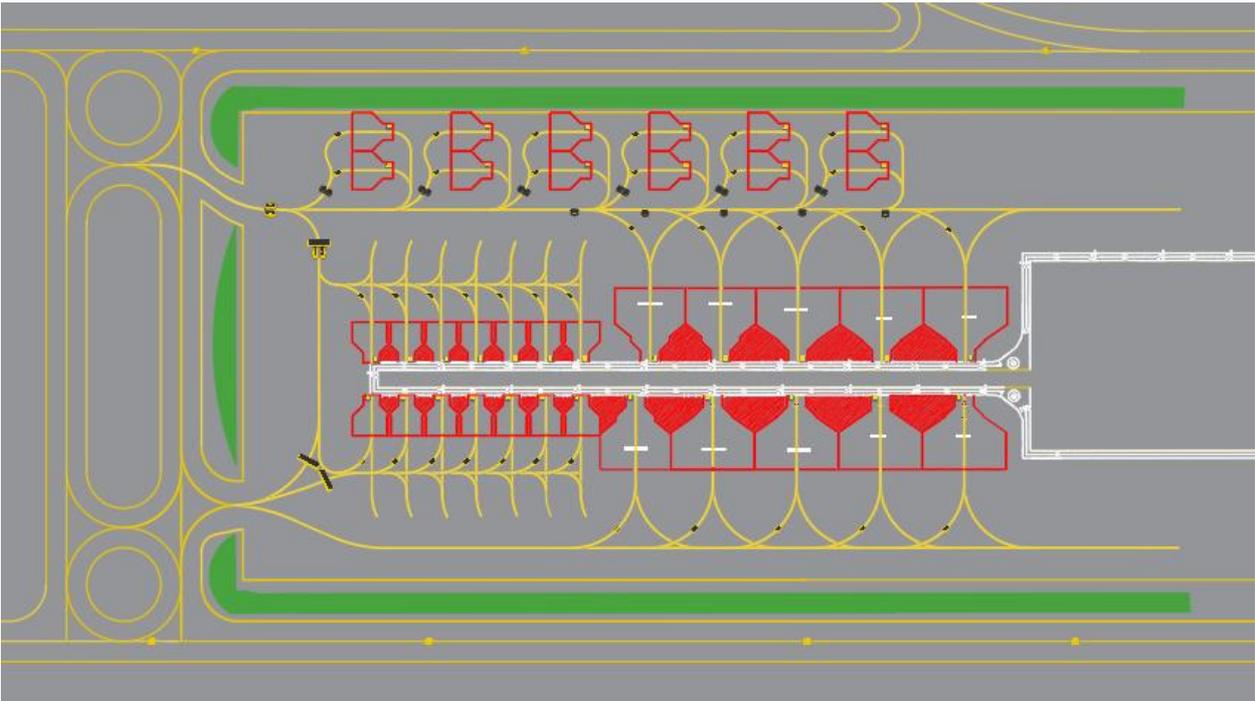


Figura 5-3. Plataforma de estacionamiento diseñada. Fuente: *Elaboración propia*.

Puede observarse en la figura anterior que existen dos tipos de puestos de estacionamiento, en contacto y en remoto. A continuación, se especifica las características de ambas tipologías.

### 5.2.1 Puestos en contacto

Los puestos en contacto pueden dividirse en dos zonas. Unos puestos que se encuentran más cerca del núcleo de la plataforma, formado por un total de 10 posiciones múltiples capaces de dar servicios a aeronaves de gran tamaño; otros puestos más alejados del núcleo de la plataforma, un total de 14.

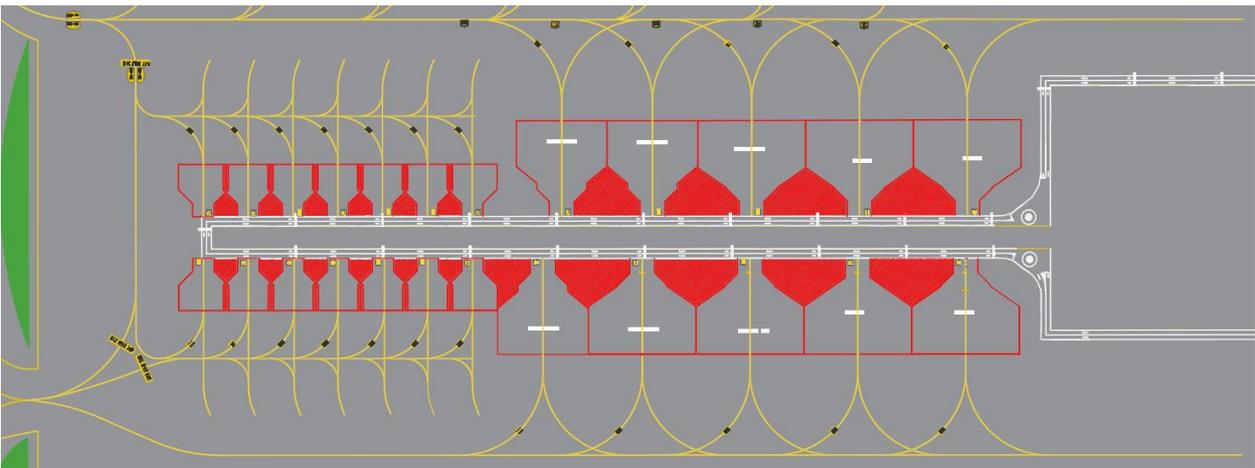


Figura 5-4. Plataforma de estacionamiento diseñada. Puestos en contacto. Fuente: *Elaboración propia*.

Los puestos que pueden verse en la figura están repartidos de la siguiente manera:

- Los que se encuentran en el lado derecho, esto es, los que se encuentran más cerca del núcleo de la terminal, están destinados a ser utilizados por las aeronaves de gran tamaño. En exclusiva los primeros 3 puestos de cada fila están capacitados para albergar hasta un A380. Además de esto, se facilitan marcas para estacionamiento de otras aeronaves.

- Los de el lado izquierdo son destinados principalmente para las aeronaves de tipo C, esto es, las aeronaves predominantes en los tráficos que se dan en el aeropuerto, B737 y A320.

Este diseño se justifica en el uso que se va a hacer de los mismos a lo largo del tiempo. Se producirá un mayor número de aeronaves de tipo C, produciéndose un mayor tránsito de las mismas por la plataforma. Por ello, se le asignan los puestos de más fácil acceso y con salida casi inmediata de la zona de estacionamiento, para evitar interferencias con el resto de puestos de estacionamiento y con las aeronaves estacionadas en los mismos. Además, los aviones más voluminosos descargan un gran volume de pasajeros, los cuales buscan, o bien la salida del aeropuerto, o bien el puesto de tránsito que le conduzca a su próxima aeronave. Todo esto se alberga cerca del núcleo de la terminal y, con la colocación de las aeronaves más voluminosas al comienzo del muelle, se ayuda a evitar la posible congestión de este por parte de los pasajeros desembarcados.

### 5.2.2 Puestos en remoto

Los puestos de estacionamiento en remoto se encuentran situados en la zona de la plataforma más próxima a la Antigua pista de aterrizaje, y se compone de puestos de estacionamiento para aeronaves tipo C, con el objetivo de cubrir el tipo de aeronave más demandante que se da dentro de los tráficos anuales del aeropuerto.

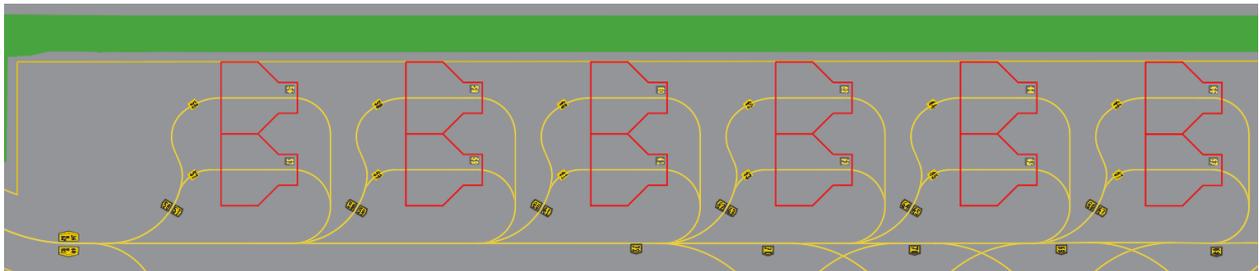


Figura 5-5. Plataforma de estacionamiento diseñada. Puestos en remoto. Fuente: Elaboración propia.

La elección de colocación en esta forma es meramente por cuestión de espacio libre. Después del dimensionamiento de los puestos en contacto y, teniendo en cuenta las rutas de rodaje de las aeronaves y las distancias de seguridad de las mismas, el espacio disponible se reducía a un área en la que era posible ejecutar dos hileras de puestos de estacionamiento. Además de puestos para los tipo C, estos puestos también pueden albergar aeronaves con envergadura inferior. Al igual que en el caso de los puestos de estacionamiento en contacto, los puestos de estacionamiento en remoto cuentan con marcas para el posicionamiento de la rueda de morro delantero de las distintas aeronaves aptas para el estacionamiento en los mismos.

## 5.3 Simulaciones

En los planos descriptivos que acompañan a este document se especifican los trazados de las aeronaves que van a hacer uso de los estacionamiento mencionados. Para la simulación de los movimientos de las aeronaves, se ha tenido en cuenta los siguientes aspectos:

- Distancias de seguridad. Todas las aeronaves deben contar con una zona alrededor de las mismas libres de cualquier tipo de obstáculo y, durante el rodaje de la misma, se debe garantizar que no se produce ningún tipo de violación de dicha distancia. Esta información viene incluida en el Anexo 14.
- Velocidad de rodaje máxima. Las simulaciones se detallan para una velocidad de rodaje máxima, la cual no puede ser sobrepasada, pues generaría ciertas incertidumbres a la hora de analizar las rutas de rodaje y sería posible aue las mismas se salieran del trazado diseñado.
- Ángulo de rotación de la rueda del tren de morro. Cada fabricante de aeronave especifica cuál es el

ángulo máximo al que puede girar la rueda del tren delantero, la cual designa el arco de circunferencia que sigue una aeronave cuando se encuentra siguiendo un trazado curvo.

Con todo esto, para cada aeronave y cada puesto se ha diseñado las siguientes rutas de acceso y salidas de las mismas.

### 5.3.1 Simulaciones de entrada a puestos de estacionamiento

La entrada a los puestos de estacionamiento se realiza de manera autopropulsada, y limitándose al rodaje por las calles de acceso a los puestos de estacionamiento y siguiendo la red de señales horizontales diseñadas para ello. La aeronave se detiene en el punto designado para ello, guardando las distancias de seguridad con el extremo delantero del puesto de estacionamiento.

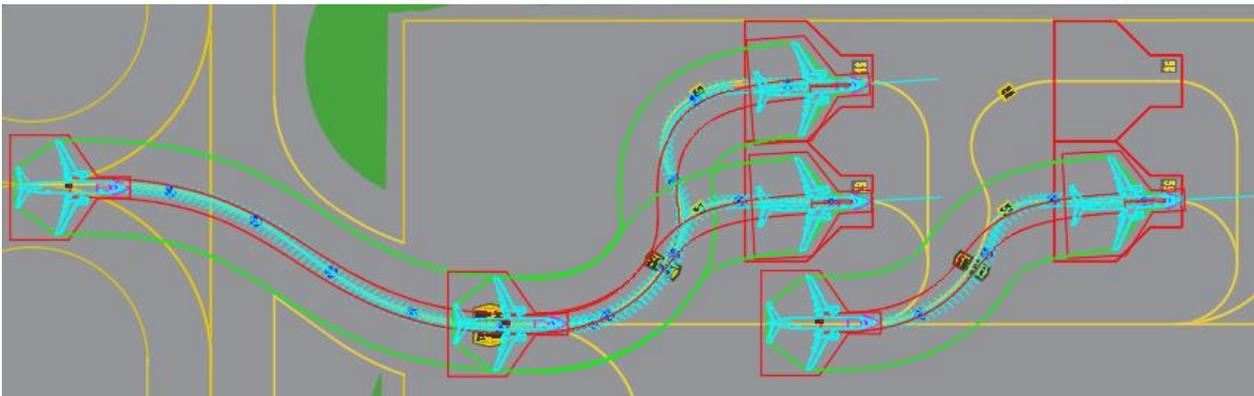


Figura 5-6. Acceso a los puestos de estacionamiento remotos por parte de aeronaves tipo C. Fuente: *Elaboración propia.*

Puede verse como las aeronaves siguen perfectamente el trazado de las calles de acceso a los puestos de estacionamiento, incluso a los primeros que se encuentran cerca de la calle de rodaje paralela a la plataforma, para los cuales es necesario realizar una doble curva a izquierda. Para los puestos que quedan en la parte superior de la imagen, por motivos de giro de la rueda del tren delantero, ha sido necesario dimensionar un sobre viraje para que pueda posicionarse correctamente dentro del puesto de estacionamiento.

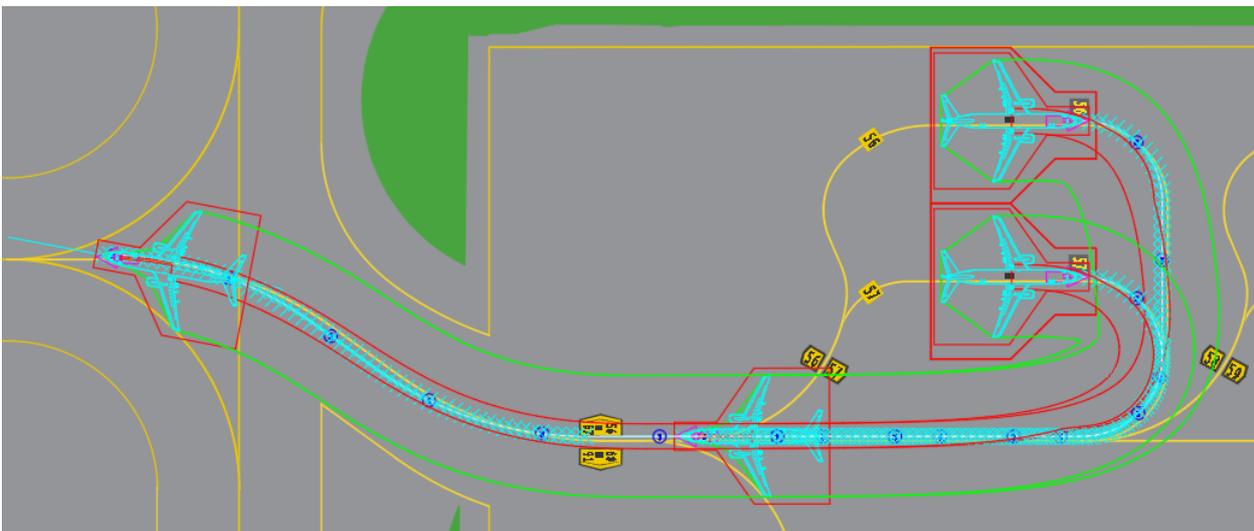


Figura 5-7. Salida de los puestos de estacionamiento remotos por parte de aeronaves tipo C. Fuente: *Elaboración propia.*

La salida de los puestos de estacionamiento en remoto se realiza de manera autopropulsada, no siendo necesario en este caso realizar un sobre viraje ni maniobras forzadas.

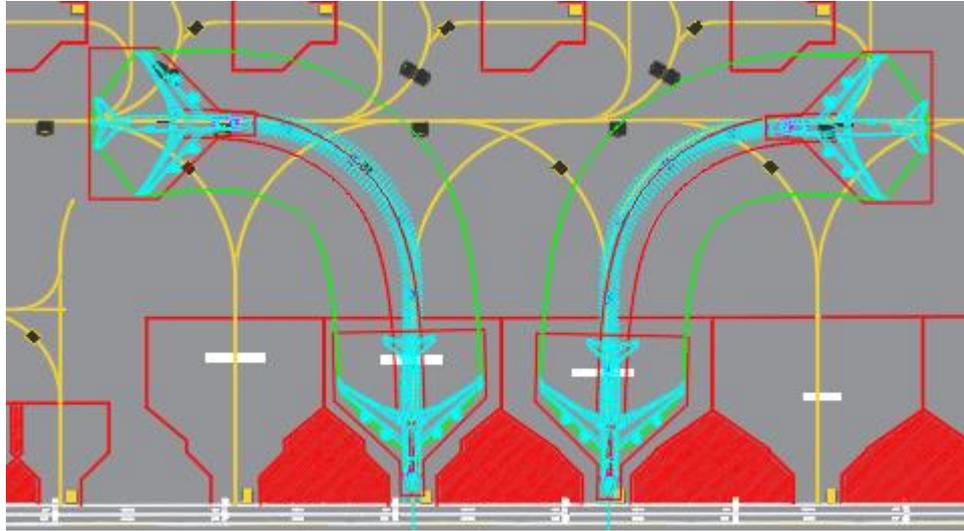


Figura 5-8. Salida y entrada a los puestos de estacionamiento en contacto por parte de un B747. Fuente: *Elaboración propia.*

En el caso de los puestos en contacto, no es posible la salida de estos puestos de manera autopropulsada, por lo que se tiene que recurrir a un tractor push back. El retroceso se haría siguiendo el mismo recorrido que para la entrada pero en sentido inverso. En la imagen, aparece el acceso al puesto en la simulación de la izquierda y la del retroceso a la derecha.

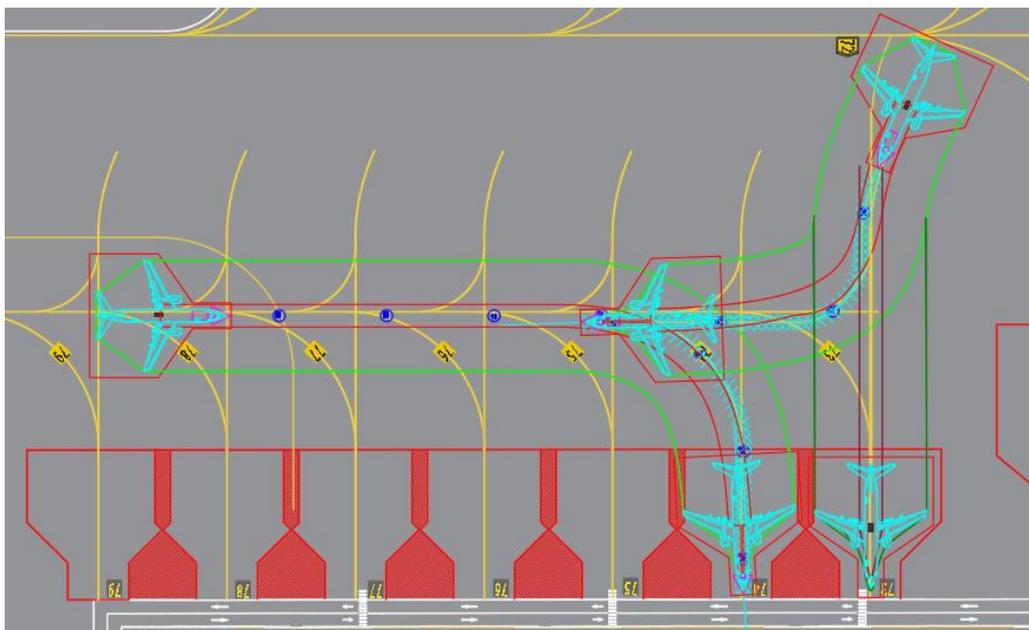


Figura 5-9. Salida y entrada a los puestos de estacionamiento en contacto por parte de un A380. Fuente: *Elaboración propia.*

Las maniobras que tienen que realizar las aeronaves A380 para acceder a los puestos destinados para su

estacionamiento son las más complicadas. El acceso sería de forma similar al realizado por el B747, pero el retroceso, realizado con tractor Push Back, debe hacerse en dos maniobras. La primera es un retroceso y un giro para posicionar la aeronave de modo que facilite el giro para la siguiente maniobra, y un avance de la misma para posicionarse en las calles que dan acceso a estos puestos. En la imagen aparece el acceso al puesto representado por la simulación de la izquierda y el de salida del puesto con las dos maniobras a la derecha.

Con esto queda demostrado la viabilidad operacional del diseño de los puestos de estacionamiento.

# 6 DISEÑO DE SEÑALIZACIÓN E ILUMINACIÓN

---

La señalización proyectada en el presente capítulo contempla la realización de toda aquella señal necesaria y destinada a delimitar en el caso de la señalización horizontal las distintas zonas para la realización de las maniobras tanto de aeronaves como de vehículos de asistencia, o en el caso de la señalización vertical a facilitar la circulación de las aeronaves en sus maniobras por las nuevas áreas de movimiento.

## 6.1 Señalización horizontal

### 6.1.1 Generalidades

La señalización horizontal se realizará mediante la colocación de marcas viales sobre el pavimento en el proceso de pintado que definirán el área de cada puesto, los ejes de entrada a los mismos, su identificación, los límites de las calles, las zonas de estacionamiento de equipos, límites de viales, etc. El pintado de la señalización se efectuará sobre pavimento de hormigón y pavimento asfáltico, empleando la pintura adecuada para cada tipo de pavimento. Se empleará distintos colores debido a la gran cantidad de marcas necesarias (blanco, negro, rojo y amarillo) y se empleará pintura de contraste en las señales de color blanco que se coloquen sobre el pavimento de hormigón, siempre bajo la normativa.

Las señales de calle de rodaje y las señales de los puestos de estacionamiento de aeronaves serán amarillas, mientras que las líneas de seguridad en las plataformas serán de color rojo, de modo que contraste con el utilizado para las señales de puestos de estacionamiento. Dado que se trata de un aeropuerto donde se efectúan operaciones nocturnas, las señales de la superficie de los pavimentos deben ser de material reflectante diseñado para mejorar la visibilidad de estas. Los colores de los que estarán compuestas las señales son:

- Amarillo RAL 1023.
- Negro RAL 9011.
- Rojo RAL 2002.
- Blanco RAL 9010.

### 6.1.2 Señalización en calles de rodaje y de acceso a estacionamiento.

Todas las calles deberán quedar perfectamente definidas, para lo que se procederá al pintado tanto del eje de las nuevas calles como del borde de estas.

La señalización propuesta para las calles de rodaje es la siguiente:

- Señal de eje de calle de rodaje –TCL-: Esta señal tiene iguales características que la señal de entrada



Figura 6-1. Señal de eje de calle de rodaje. *Fuente: OACI.*

- Señal de borde de calle de rodaje.

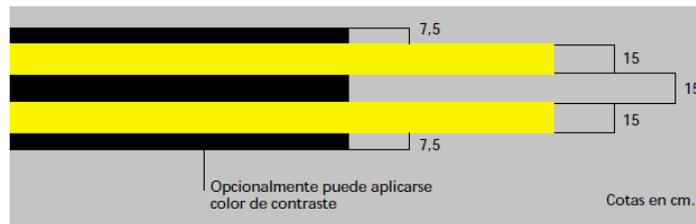


Figura 6-2. Señal de borde de calle de rodaje. *Fuente: OACI.*

- Señal de márgenes pavimentados: consiste en fajas transversales de 90 centímetros de espesor y con una longitud en función del ancho del margen y manteniendo distancias de separación entre faja y señal de borde de calle de rodaje 15 centímetros y entre faja y borde del pavimento estabilizado de 1.50 metros.
- Señales de dirección o destino: se colocarán en intersecciones de calle de rodaje y consisten en señales pintadas sobre el pavimento, definidas por tener caracteres negros sobre fondo amarillo.

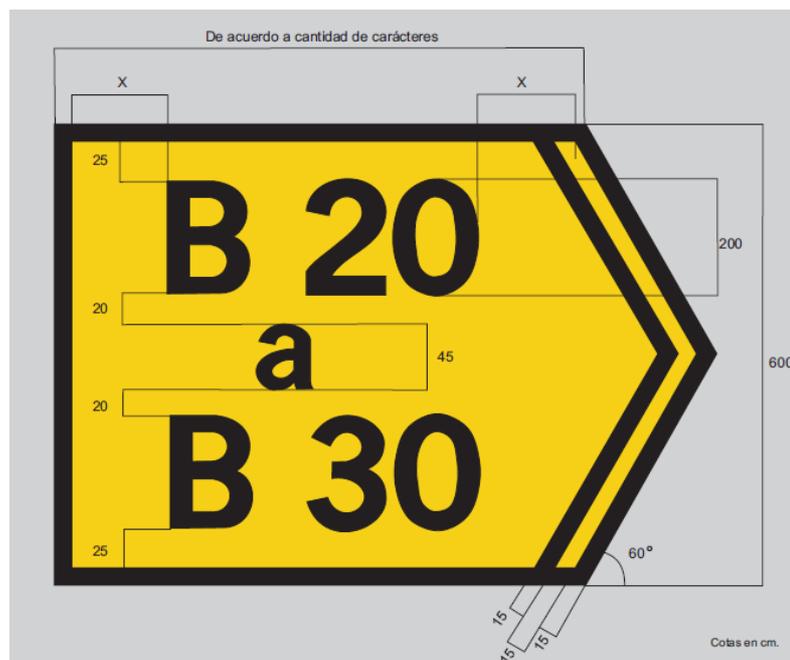


Figura 6-3. Señal de dirección o destino. *Fuente: OACI.*

### 6.1.3 Señalización en plataforma

Dentro de la señalización propia de la plataforma se ejecutarán las marcas sobre el pavimento de hormigón aplicando pintura de contraste en aquellas marcas que por sus características lo exijan.

Dentro del área de plataforma será necesario indicar los límites de los diferentes puestos de estacionamiento, las señales de entrada y salida de los mismos, así como los letreros de designación de los puestos e indicación del tipo de aeronave junto con la barra de rueda de morro, barra de parada. Se definirán los límites de seguridad de la plataforma, las zonas de espera y estacionamiento para vehículos de handling, así como las zonas de no aparcamiento, señales de instalaciones como hidrantes, tomas de tierra, anclajes, etc.

A continuación se procede a realizar una breve descripción de las características de las señales más importantes a ejecutar:

- Bordes de Área de Movimiento o línea de seguridad en plataforma: consiste en una triple línea continua, dos blancas de 5 cm de espesor y una roja de 30 cm de espesor en las zonas que se vean afectadas.



Figura 6-4. Señal de Borde de Área de Movimiento. Fuente: OACI.

- Límite de Área de restricción de equipos: serán de color rojo continuas según se especifica en el plano de Señalización Horizontal del presente Trabajo. Será discontinua en puestos de estacionamiento superpuesto y de la aeronave de menos frecuencia.

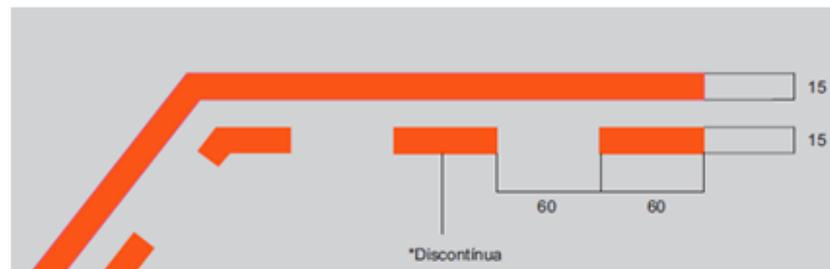


Figura 6-5. Señal de límite de Área de restricción de equipos. Fuente: OACI.

- Línea de Área de no estacionamiento: consistirá en una línea continua de 15 cm de espesor de color rojo que delimitará el área y el rayado del área con líneas de 10 cm de espesor también en rojo. Se realizará en las zonas donde no se puede estacionar a fin de posibilitar la maniobra de entrada/salida de puesto de estacionamiento de las aeronaves.



Figura 6-6. Señal de línea de Área de no estacionamiento. Fuente: OACI.

- Señal de entrada de puesto de estacionamiento: se realizará mediante triple línea continua; dos de color negro de 10 cm de espesor y una de color amarillo de 30 cm de espesor.



Figura 6-7. Señal de entrada de puesto de estacionamiento. Fuente: OACI.

- Señal de indicación de puestos de estacionamiento: se pintarán en negro y amarillo según pertenezcan a la TCL, en cuyo caso se denomina identificación de puesto de estacionamiento en señal de entrada - fondo amarillo con borde y número en negro- o al puesto de estacionamiento, en cuyo caso recibe el nombre de señal de identificación de puesto de estacionamiento (fondo negro y número en Amarillo).

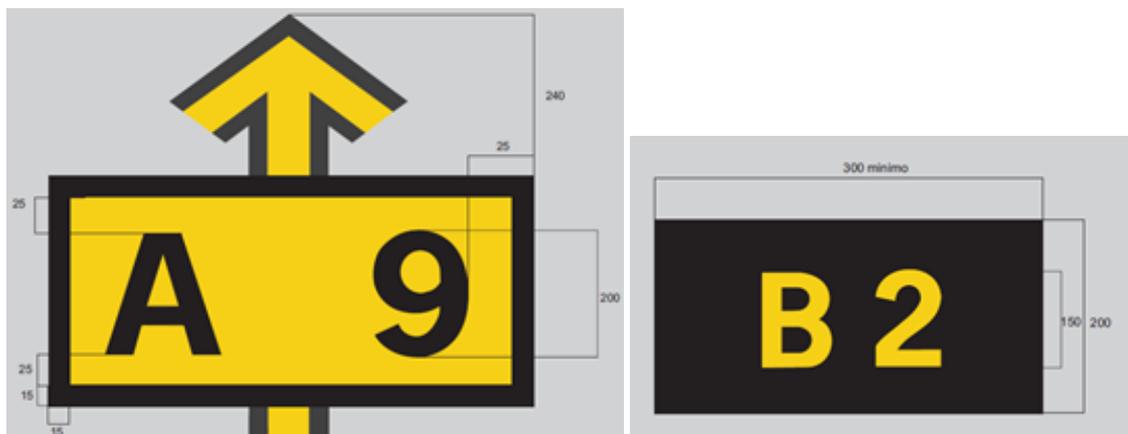


Figura 6-8. Señal de indicación de puestos de estacionamiento. Fuente: OACI.

- Señal de barra de rueda de morro e identificación del tipo de aeronave: esta señal indica al señalero el lugar donde debe quedar situada la rueda del tren de morro finalizada la maniobra de estacionamiento. Las características de la señalización son las mismas que en la barra de parada, diferenciándose en que

su longitud debe ser como mínimo 180 cm y se coloca perpendicular a la TCL.

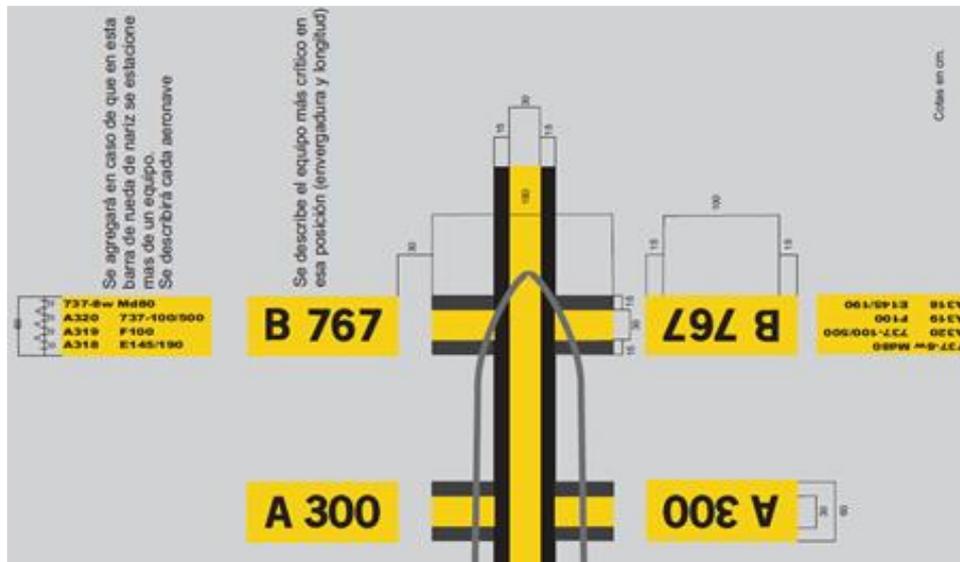


Figura 6-9. Señal de barra de rueda de morro e identificación de tipo de aeronave. Fuente: OACI.

#### 6.1.4 Señalización en viales

La señalización propuesta para los viales de servicio es:

- Eje de vial: línea discontinua de 10 cm de espesor, de color blanco con trazos de 60 cm de largo y separados entre sí 60 cm, permitiendo rebasarla en doble sentido.
- Borde de vial en plataforma: consiste en doble línea continua de espesor 10 cm de color blanco.

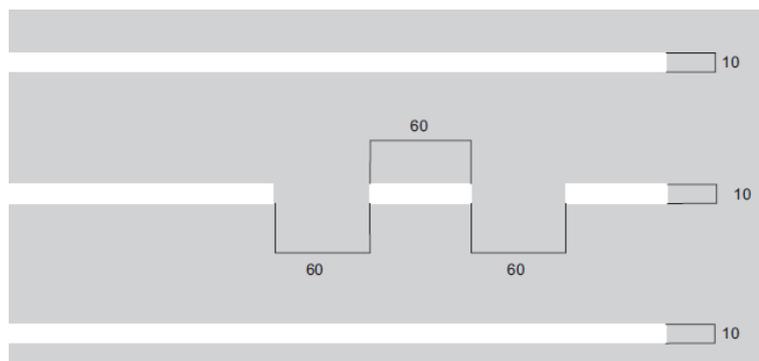


Figura 6-10. Señal de borde de vial en plataforma. Fuente: OACI.

- Símbolos: para facilitar la información a los usuarios del vial, se trazan sobre el pavimento las siguientes indicaciones: limitación a 30 Km/h, flechas indicadoras del sentido de circulación, letrero de chorro de motores y barras de parada.

En el plano de Señalización Horizontal del presente proyecto se recoge la distribución en planta de la señalización anteriormente descrita, así como los detalles de estas necesarios para su ejecución.

## 6.2 Características de la pintura

Se plantea emplear distintos tipos de pavimentos para los puestos de estacionamiento y las calles de acceso a los mismos y las calles de rodaje colindantes.

### 6.2.1 Pinturas en pavimento de hormigón

Toda la señalización propuesta que se lleve a cabo sobre pavimento de hormigón se realizará mediante pintura acrílica en base acuosa de altas prestaciones especialmente diseñadas para su aplicación en aeropuertos y que incorporan dotación de micro-esferas de vidrio para hacer reflectante dicha señalización.

Las señales de símbolos se ejecutarán a mano y se aplicará en dos manos para conseguir un mejor acabado.

### 6.2.2 Pinturas en pavimento asfáltico

Toda la señalización propuesta que se vaya a ejecutar sobre pavimento asfáltico se realizará mediante pintura acrílica modificada en base solvente específica para carreteras o viales. Este tipo de pinturas destacan por su fácil aplicación tanto a máquina como de forma manual y puede ser usada sólo o postmezclada con microesferas de vidrio sobre pavimentos de hormigón o asfálticos.

### 6.2.3 Método de aplicación

En primer lugar se procede con la limpieza de la superficie de aplicación de la pintura y, en su caso, al granallado del riego de curado del hormigón; si fuera necesario, se procederá al tratamiento de la superficie de aplicación con laca de imprimación sobre el pavimento.

La pintura a emplear es del tipo acrílica de emulsión reflexiva, se aplica en dos manos e incluye el extendido de microesferas reflectantes de vidrio. En general, la pintura es amarilla para las señales de rodaje de aeronaves, blanca para las de vehículos y roja en las áreas delimitadoras.

La aplicación de la pintura debe realizarse con la siguiente proporción:

- 0.650 kg/m<sup>2</sup> dotación de pintura.
- 0.480 kg/m<sup>2</sup> dotación de microesferas.

## 6.3 Señalización vertical

### 6.3.1 Señalización de plataforma

Además de la señalización horizontal como ayuda a la circulación de aeronaves se plantea la necesidad de ejecutar una señalización mediante letreros verticales, que se posicionarán en el campo de vuelos preferentemente al lado izquierdo de la calle de rodaje.

La señalización vertical está compuesta por los distintos tipos de letreros existentes. Éstos se utilizan para suministrar información, bien fija o variable, obligatoria o no y deben ser frangibles. Deben estar colocados tan cerca del borde de los pavimentos como sea posible pero cuidando que no entren en contacto con ninguna de las aeronaves que operen en el aeropuerto. Al estar situados cerca de una calle de rodadura deberán ser también lo suficientemente bajos para conservar la distancia de guarda respecto a las barquillas de reactores.

A continuación se definen de forma general los letreros empleados según su aplicación en el presente proyecto:

- Letreros de información de dirección o destino: se emplean para indicar el sentido que debe seguir la aeronave. Estarán ubicados en las calles de rodaje y son de fondo negro con caracteres amarillos para las señales de emplazamiento, amarillos con caracteres negros para las señales de dirección o destino.

Los letreros serán de tres módulos y de cuatro módulos, e irán iluminados interiormente mediante lámparas de tipo LED de 60 W de potencia para los de tres módulos y de 80 W para los de cuatro módulos. Serán de tipo unidireccional. Se sitúan según las distancias establecidas en la Normativa.

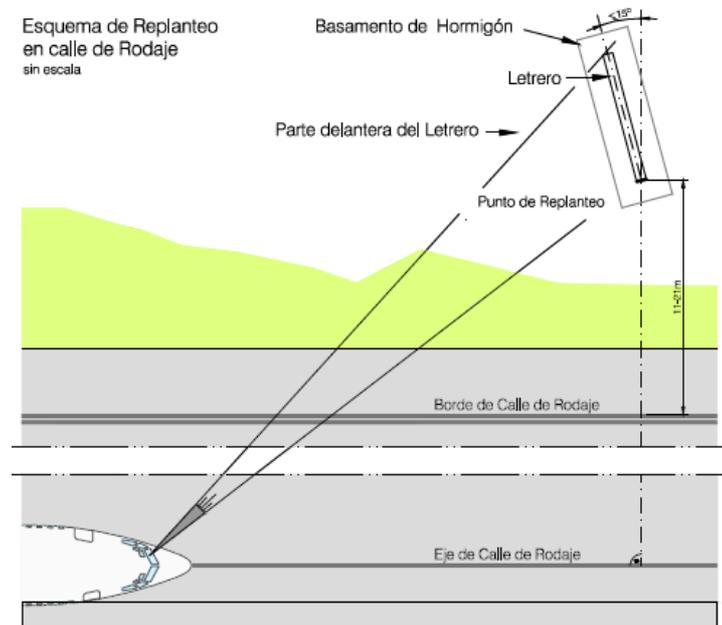


Figura 6-11. Esquema de colocación de cartel. Fuente: OACI.

## 6.4 Iluminación

La iluminación debe estar acorde con las recomendaciones del Anexo 14 de OACI, Volumen 1, y con el Manual de Diseño de Aeródromo, Parte 4, Capítulo 13. Estos requerimientos se resumen en criterios para selección de la fuente luminosa, luminancia, de deslumbramiento y de iluminación de emergencia; además de otros criterios relativos al diseño de la instalación.

Las condiciones mínimas de iluminación descritas en la normativa citada fijan:

- Un mínimo de 20 lx con una relación 4 a 1 –de valor promedio a mínimo- en puestos de estacionamiento de aeronaves para iluminancia horizontal y de 10 lx a una altura de 2 m en las direcciones pertinentes para iluminancia vertical.
- Una iluminancia de 10 lx para las áreas que se encuentran entre los puestos de estacionamiento de aeronaves y los límites de la plataforma –equipo de servicio, zona de estacionamiento, carretera de servicio- o el 50% del promedio de luminancia horizontal de los puestos de estacionamiento de aeronave, dentro de una relación de uniformidad de 4 a 1 –de valor promedio a mínimo- en esta zona.

Dichos requerimientos tratan de satisfacer las funciones básicas definidas por la Normativa:

- Ayudar al piloto en el rodaje de la aeronave para entrar y para salir del puesto definitivo de estacionamiento.
- Proporcionar iluminación adecuada para el embarque y desembarque de pasajeros, para que el personal lleve a cabo las funciones de carga y descarga de mercancías, reabastecimiento de combustible y cualesquiera otras para servicios en plataforma.
- Mantener la seguridad del aeropuerto.

Dicha luminancia ha de permitir una iluminación mínima de las áreas fuera de plataformas reduciendo al máximo la contaminación lumínica que pudiera apantallar otras ayudas visuales situadas en el exterior de las mismas.

### 6.4.1 Requerimientos relativos a deslumbramientos

Según el Doc. 9157 en su parte cuarta se define que:

*13.3.7 Debería evitarse la luz directa procedente de los proyectores en la dirección de la torre de control y de las aeronaves que aterrizan. El enfoque de la luz debería ser, en la medida de lo posible, hacia afuera de las torres de control o de las aeronaves que aterrizan. Debería restringirse a un mínimo el uso de la luz directa de los reflectores por encima del plano horizontal [...]*

*13.3.8 A fin de reducir al mínimo el deslumbramiento directo o indirecto:*

*La altura de montaje de los proyectores debería ser por lo menos dos veces el máximo de la altura de los ojos de los pilotos de las aeronaves que utilizan habitualmente el aeropuerto [...]*

*El emplazamiento y la altura de los postes debería ser tal que se reduzca a un mínimo el inconveniente de deslumbrar al personal de tierra.*

En el caso del Aeropuerto Jorge Chávez, existe una aeronave que destaca en tamaño por encima del resto, y es el modelo A380 de Airbus. Para conocer la altura de los ojos de los pilotos de esta aeronave, debe acudir a la información facilitada por el propio fabricante, recogida en la siguiente imagen:

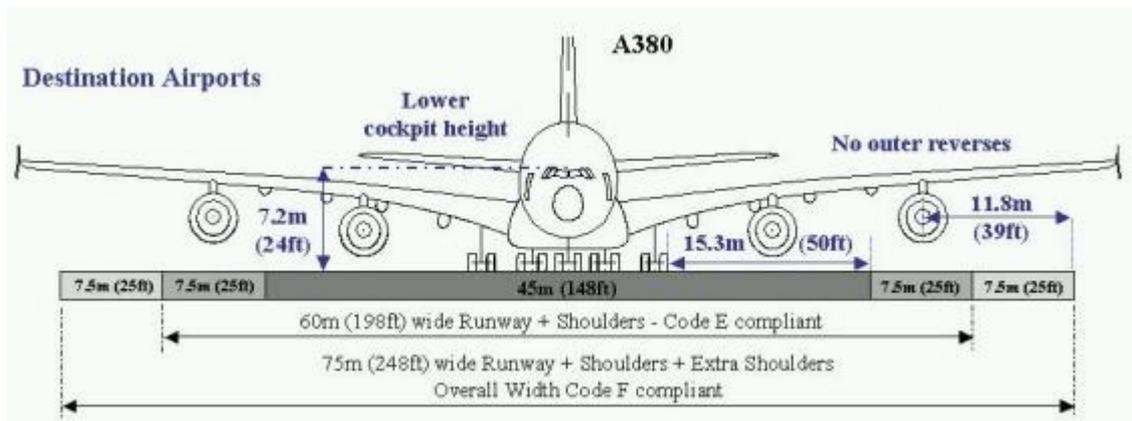


Figura 6-12. Especificaciones dimensionales del A380. Fuente: Airbus

De la imagen se extrae que la altura a la que se encuentran los ojos del piloto puede ser considerada como 7.2 m. En base a esto, se conoce que la altura del fuste de la torre de iluminación debe de ser de unos 15 m.

Ha de tenerse en cuenta de forma adicional que el criterio de montaje no puede entrar en conflicto con lo expuesto en el Doc. 9157 en su artículo 13.4.1, en el que se especifica:

*La altura de los mástiles en los que vayan montados los proyectores debería conformarse a los requisitos de franqueamiento de obstáculos pertinentes que figuran en el Anexo 14, Volumen I, Capítulo 4;*

En este caso, la superficie que puede llegar a entrar en conflicto con la altura del mástil es la superficie de transición interna de ambas pistas, la cual se define de la siguiente manera:

*Superficie que sirve como superficie limitadora de obstáculos para las infraestructuras de ayuda a la navegación, las aeronaves y los vehículos que tengan que estar en las cercanías de la pista. Es una superficie ascendente con pendiente de 33.3% hacia fuera que se apoya en el borde de la superficie de aproximación interna y el de la superficie de aterrizaje interrumpido hasta la superficie horizontal interna, y tiene como base la paralela del eje de la pista contenida en un plano vertical que pasa por el borde de la franja.*

En este caso, con una pendiente del 33.3%, supondría que cada 100 m de separación con respecto a la franja de las pistas, la superficie pasaría a una altura de 33.3 m. En este caso, los postes de iluminación proyectados se encuentran a una distancia mucho mayor que 100 m, por lo que la altura de los postes (15 m) no supondría una violación de esta superficie.

Los puestos proyectores contarán con unas características similares al expuesto en la siguiente figura, obtenido a través de una visita a un aeropuerto de la red Aena.



Figura 6-13. Tipo de puesto proyector.

# 7 CONCLUSIONES

---

Tras la culminación de la descripción del proyecto que se ha elaborado como objeto de este Trabajo Fin de Máster, pueden ser planteadas las conclusiones a las que se llegan:

- El diseño de una plataforma de estacionamiento de aeronaves engloba a otros estudios además de los que se han expuestos. Estudios del estilo del análisis del diseño de un sistema de drenaje o del impacto económico que puede repercutir la creación de una plataforma de estas dimensiones en un entorno aeroportuario como el que se ha especificado. Se ha optado por un diseño funcional y constructivo básico, reuniendo los estudios de mayor importancia a nivel aeronáutico, como pueden ser el diseño de los pavimentos, el estudio de la capacidad futura o el análisis de la viabilidad del diseño mediante simulaciones de movimiento de aeronaves. A nivel aeronáutico, el Trabajo reúne los conocimientos que han sido desarrollados en numerosas asignaturas del Grado y del Máster en Ingeniería Aeronáutica.
- Este trabajo destaca por su componente práctica y está estrechamente relacionado con el trabajo diario que puede ser desarrollado dentro del entorno de la empresa privada. Diariamente se desarrollan en las oficinas técnicas estudios de viabilidad de ejecución de instalaciones aeroportuarias similares al presentado, normalmente como parte de Expedientes y Proyectos más grandes. Este Trabajo puede servir como una aproximación a lo que realmente puede llegar a realizar un Ingeniero Aeronáutico dentro del mundo de la empresa privada.
- A nivel personal, el Trabajo ha supuesto un reto importante, pues se ha tenido que desarrollar conocimientos y competencias que no habían sido experimentadas con anterioridad. Si bien muchas han sido adquiridas durante el desarrollo de la vida académica, y otras durante la vida profesional, aún existen numerosas competencias, habilidades y conocimientos por cubrir. Este Trabajo, sin duda, ha ayudado a mejorar y a progresar como profesional dentro del campo de la aeronáutica, más concretamente en la especialidad aeroportuaria.
- Para llevar a cabo un Proyecto de esta envergadura, resulta necesario la participación de ingenieros de muchas disciplinas y especialistas en materias de diversa índole. Resulta tremendamente complicado que un Ingeniero Aeronáutico sea capaz por el mismo de desarrollarlo eficazmente. Es por esta razón que este Trabajo también ha ayudado a conocer los límites con los que cuenta el autor, y cuáles de ellos deben ser ampliados, de cara a desarrollar de una manera eficaz Trabajos de este tipo.



# REFERENCIAS

---

- [1] OACI, “Manual de Diseño de Aeródromos”, Doc. 9157.
- [2] OACI, “Anexo 14”.
- [3] FAA, “Advisory Circular 150/5320-6F”, Airport Pavement Design and Evaluation.
- [4] Horonjeff et. Al., “Planning and designo f airports”, 2010.
- [5] Aena, “Planes directores de varios aeropuertos de la red”.
- [6] CORPAC. S.A., “AIP Aeropuerto Jorge Chávez”.
- [7] LAP “Informes anuales desde el año 2002 al año 2007”, Lima Airport Partners.
- [8] Airbus, “Manual de Operaciones del A380 y del A320”.
- [9] Boeing, “Manual de Operaciones del B747 y del B737”.

# Trabajo Fin de Máster

## Máster en Ingeniería Aeronáutica

### Anexo A: Cálculo de Capacidad

Autor: Manuel Jesús Ibáñez Tirado

Tutor: Jorge Juan Fernández de la Cruz

**Dpto. Construcción y Proyectos de Ingeniería**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019





Trabajo Fin de Máster  
Máster en Ingeniería Aeronáutica

## **Anexo A: Cálculo de Capacidad**

Autor:

Manuel Jesús Ibáñez Tirado

Tutor:

Jorge Juan Fernández de la Cruz

Profesor asociado

Dpto. de Construcción y Proyectos de Ingeniería

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



# Índice

---

<b>Índice</b>	<b>5</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>7</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>9</b>
<b>A. Introducción</b>	<b>11</b>
<b>B. Metodología de cálculo de capacidad</b>	<b>13</b>
<i>B.1. Capacidad en operaciones de solo aterrizaje</i>	<i>13</i>
<i>B.2. Capacidad de operaciones de solo despegue</i>	<i>16</i>
<i>B.3. Capacidad en operaciones mixtas</i>	<i>16</i>
<i>B.4. Metodología empleada en los cálculos de la Capacidad Práctica</i>	<i>17</i>
<b>C. Capacidad del área de movimiento</b>	<b>19</b>
<i>C.1. Capacidad del Sistema de Pistas actual</i>	<i>19</i>
<i>C.2. Capacidad del Sistema de Pistas futuro</i>	<i>21</i>
C.2.1. Capacidad en configuración de operaciones segregadas	22
C.2.2. Capacidad en configuración de operaciones mixtas	24
C.2.3. Capacidad de la plataforma de estacionamiento	26
<b>Referencias</b>	<b>11</b>



# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla C-1. Mezcla, velocidad de aproximación y tiempo de ocupación en pista de los tipos de aeronaves que operan en el aeropuerto. <i>Elaboración propia.</i>	19
Tabla C-2. Separación mínima longitudinal exigida por el ATC [en nm]. <i>Elaboración propia.</i>	20
Tabla C-3. Número de salidas por hora y demoras correspondientes. <i>Elaboración propia.</i>	23
Tabla C-4. Número de llegadas por hora y demoras correspondientes. <i>Elaboración propia.</i>	23
Tabla C-5. Operaciones en condición de operaciones segregadas. <i>Elaboración propia.</i>	24
Tabla C-6. Mezcla, velocidad de aproximación y tiempo de ocupación en pista de los tipos de aeronaves que operan en la pista 15R/33L. <i>Elaboración propia.</i>	24
Tabla C-7. Mezcla, velocidad de aproximación y tiempo de ocupación en pista de los tipos de aeronaves que operan en la pista 15R/33L. <i>Elaboración propia.</i>	25
Tabla C-8. Operaciones en condición de operaciones independientes. <i>Elaboración propia.</i>	26
Tabla C-9. Tráfico de aeronaves y porcentaje del total del año 2017. <i>Fuente: lima-airport.com</i>	26
Tabla C-10. Tiempo medio de estancia en un puesto de estacionamiento de cada tipo de aeronave. <i>Fuente: Planes directores de varios aeropuertos.</i>	27
Tabla C-11. Datos de cálculo de capacidad. <i>Elaboración propia.</i>	27



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura B-1. Diagrama espacio-tiempo. <i>Fuente: [1]</i>	14
Figura B-2. Margen de seguridad entre llegadas. <i>Fuente:[1]</i> .	15
Figura B-3. Diagrama demanda-retraso medio. <i>Fuente:[2]</i> .	17



# A. INTRODUCCIÓN

---

**E**n este anexo se plantea la metodología y el cálculo de la capacidad del área de movimiento del aeropuerto internacional Jorge Chávez, en su configuración actual y en su configuración futura tras la ejecución de la ampliación que se va a realizar.

Para ello, se emplearán desarrollos matemáticos que ayuden a entender cómo se obtiene la capacidad del área de maniobras de un aeropuerto, y que son de gran utilidad para conocer la situación actual de la operatividad del campo de vuelo y analizar el estado de saturación de este. Conocidos estos datos, se puede comenzar a estudiar qué debilidades son las que tiene el actual sistema de pistas y calles de rodaje y, en base a eso, elaborar una solución eficiente en el amrcio del estacionamiento de aeronaves.

Se expondrán ecuaciones y fórmulas estadísticas ampliamente usadas en la Teoría de Colas y Estadística en general, haciendo mención a las numerosas fuentes de las que emana dicha información.



# B. METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE CAPACIDAD

---

El aeropuerto Jorge Chávez contará con dos pistas paralelas separadas más de 1500 metros entre sí, lo que le habilita para realizar operaciones independientes. Actualmente sólo dispone de una de ellas, la 15/33, pero se partirá de la existencia de ambas pistas para poder aportar información eficaz y útil para el dimensionamiento de la plataforma de estacionamiento de aeronaves que se pretende proyectar.

Para realizar un análisis de capacidad, es necesario definir previamente dos conceptos de capacidad diferentes:

- Capacidad de saturación. Número de operaciones/hora que, sirviendo bajo condiciones de demanda continuada de servicio y sin establecer restricciones derivadas de los niveles de demora alcanzados, una pista es capaz de atender.
- Capacidad práctica. Número de operaciones/hora que, sirviendo bajo condiciones de demanda continuada de servicio y con la imposición de un tiempo límite de demora por operación, una pista es capaz de atender.

La Capacidad de Saturación de las pistas será estimada mediante el método definido por Horonjeff, R. et al, en su libro *Planning & Design of Airports* (2010) [2] y. Al no disponer de métodos de simulación por ordenador, estos autores se basan en el concepto de Espacio-Tiempo. Con este método, se puede obtener información del número de operaciones máximos que puede llegar a absorber una pista a partir de la obtención de una serie de datos, tales como los tiempos de ocupación en pista o la separación entre aeronaves.

En función de la operatividad de las pistas, hay que realizar los siguientes cálculos:

- En pistas realizando únicamente operaciones de aterrizaje, se estima el tiempo medio esperado por operación de aterrizaje y se calcula la capacidad de la misma como la inversa de ese tiempo esperado.
- En pistas realizando únicamente operaciones de despegue, se estima el tiempo medio esperado por operación de despegue y se calcula la capacidad de la misma como la inversa de ese tiempo esperado.
- En pistas realizando operaciones mixtas, en primer lugar, se realiza el cálculo de capacidad de la pista como si operase únicamente aterrizajes y, a continuación, se estudian los posibles huecos entre llegadas para poder realizar despegues.

## B.1. Capacidad en operaciones de solo aterrizaje

En primer lugar, se expone la capacidad de operaciones de una pista con la configuración de sólo aterrizajes, es decir, una pista a la que sólo llegan aviones y no se produce ninguna salida. Este caso en concreto es útil para los escenarios aeroportuarios en el que se tenga más de una pista y una de ellas es destinada íntegramente a las llegadas. La operación de aterrizaje de varias aeronaves a una misma pista estará influenciada principalmente por la distancia entre las mismas, según las condiciones de cada aeronave y la consideración de los márgenes de separación mínimos considerados, y por la velocidad de cada una de las aeronaves, pues la distancia depende directamente de la velocidad de aproximación a pista.

En la siguiente figura se representa un diagrama Espacio-Tiempo con algunas de las magnitudes que se emplean en el cálculo, las cuales se detallan a continuación.

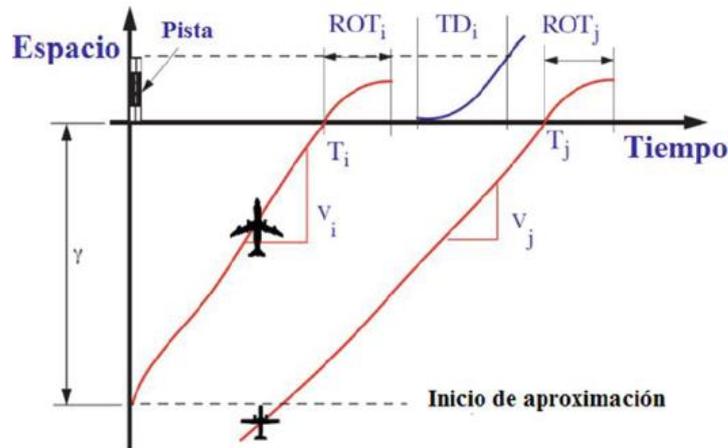


Figura B-1. Diagrama espacio-tiempo. Fuente: [1]

Siendo

$T_i$  y  $T_j$ : tiempos de aterrizaje de una aeronave y la siguiente que está en fase de aproximación.

$v_i$  y  $v_j$ : velocidad de aproximación de una aeronave y la siguiente que entra en el sistema.

$\gamma$ : distancia establecida por el ATC para la aproximación final.

$ROT_{ij}$ : tiempos de ocupación de pista de una aeronave que aterriza y la siguiente que está en fase de aproximación.

$TD_i$ : tiempo disponible para introducir un despegue en caso de operaciones mixtas.

En el caso de que la velocidad de las aeronaves difiera, se pueden dar varios casos de situaciones, a saber:

- Situación abierta (2ª aeronave más lenta): En este caso la separación entre las aeronaves irá aumentando conforme pase el tiempo, pues la aeronave que va detrás, al llevar una velocidad menor, se alejará de la aeronave colocada en la posición delantera. El tiempo entre aeronaves será estimado como el cociente entre la separación que deben guardar en fase de aproximación y la velocidad de la aeronave en cola.

$$T_{ij} = \frac{\delta_{ij}}{V_j}$$

Pueden existir posibles errores en el posicionamiento de las aeronaves, basados principalmente en el error de los aparatos de localización embarcados en las aeronaves y los equipos en tierra. Para tener en cuenta este aspecto, se añade un Buffer de tiempo, producto de la precisión con la que cuente el radar por la distribución normal del error (que oscila el 5%).

$$B_{ij} = \sigma_0 q$$

- Situación cerrada (2ª aeronave más rápida): Este caso es el contrario que la situación anterior, pues se da que la distancia entre las aeronaves decrece con el paso del tiempo, al ser más veloz la aeronave precedente. Por esta razón, resulta necesario considerar un espacio de tiempo mínimo que compense esa separación decreciente entre aeronaves. Por lo tanto, el tiempo entre aeronaves contará con un primer término idéntico al caso anterior de la situación abierta, más un segundo término que exprese ese acortamiento de la distancia mencionado.

$$T_{ij} = \frac{\delta_{ij}}{V_j} + \gamma \left( \frac{1}{v_j} - \frac{1}{v_i} \right)$$

Al igual que en el caso anterior, se tendrá en cuenta posibles errores de posicionamiento mediante un Buffer de tiempo. Éste, a su vez, recibe una corrección al alza para tener en cuenta la mayor velocidad de la segunda aeronave.

$$B_{ij} = \sigma_0 q - \delta_{ij} \left( \frac{1}{v_j} - \frac{1}{v_i} \right)$$

En la siguiente figura puede apreciarse el margen de seguridad proporcionado por la separación impuesta en el Buffer de tiempo.

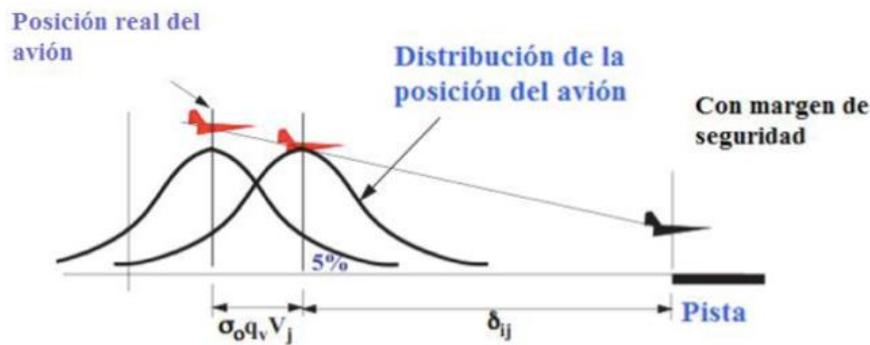


Figura B-2. Margen de seguridad entre llegadas. Fuente:[1].

Para la determinación del número límite de llegadas, se realizan los siguientes cálculos para cada combinación de tipos de aeronaves:

- $p_{ij}$  (Probabilidad de combinaciones): Probabilidad en la que se tiene en cuenta la posibilidad de que se den distintas combinaciones de aeronaves de diferentes grupos, obtenida mediante el producto de las probabilidad de cada uno de los distintos grupos de aeronaves.

$$p_{ij} = p_i p_j$$

- $T_{ij} + B_{ij}$  (Tiempo estimado entre aeronaves): Matriz de combinaciones con todas las situaciones de aproximación que pueden darse. Se tiene en cuenta el tiempo de separación entre llegadas ( $T_{ij}$ ) y el buffer de tiempo para posibles errores de posicionamiento ( $B_{ij}$ ).
- $E(t)$  (Tiempo esperado por operación): El tiempo medio de servicio global, es decir, el tiempo estimado que una aeronave de cualquier tipo consume en aterrizar desde que inicia la fase de aproximación, se obtiene mediante el producto de la probabilidad de las combinaciones y el tiempo estimado entre aeronaves, es decir:

$$E_{leg}(t) = \sum_i \sum_j p_{ij} (T_{ij} + B_{ij})$$

- $\sigma_t^2$  (Varianza): Indica de la variabilidad de los tiempos medios obtenidos anteriormente y viene dada por:

$$\sigma_t^2 = \sum_i \sum_j p_{ij} [(T_{ij} + B_{ij}) - E(t)]^2$$

Finalmente, tras la sucesión de los cálculos expuestos con anterioridad, la capacidad con la que cuenta una pista con la configuración de sólo aterrizajes será la inversa del tiempo estimado por operación, expresado en aeronaves/hora mediante la expresión:

$$C_{leg} = \frac{1}{E_{leg}(t)}$$

## B.2. Capacidad de operaciones de solo despegue

En este caso, la configuración de la pista sería de sólo despegues, suponiendo la opción que complementa a un sistema de pistas. En este caso, se busca la obtención de un tiempo medio de despegues, teniendo en cuenta la mezcla de aeronaves y las probabilidades de combinación  $p_{ij}$  consideradas en el caso anterior de sólo aterrizajes.

Para obtener el tiempo estimado que consume una aeronave de cualquier tipo en despegar desde que se encuentra en la pista (considerando esta libre y sin ningún tipo de restricción), es decir, el tiempo medio de servicio global, se acude a la siguiente expresión:

$$E_{sal}(t) = \sum_i \sum_j p_{ij}(MB_{ij})$$

Siendo:

$p_{ij}$ : Probabilidad de combinaciones.

$MB_{ij}$ : Reglas de separación impuestas por el ATC para una secuencia de despegues.

De forma análoga a la configuración de sólo llegadas, la capacidad de la pista para sólo despegues se otendrá a partir de la siguiente expresión:

$$C_{sal} = \frac{1}{E_{sal}(t)}$$

## B.3. Capacidad en operaciones mixtas

Como último caso se considera la posibilidad de que una misma pista se destine tanto para aterrizajes como despegues, lo que se conoce como operaciones mixtas. En estos casos, las operaciones de aterrizaje siempre tendrán prioridad que las operaciones de despegue, pues las posibilidades de reacción son inferiores en el caso de una aproximación, además de que existe la posibilidad del desvío de esta aeronave por causas de seguridad. Con esto se pretende mantener el menor tiempo posible en el aire a las aeronaves dispuestas a aterrizar.

Para realizar este procedimiento, se estima el intervalo de tiempo que habrá disponible entre aterrizajes para poder establecer una salida. Éste viene dado por la expresión:

$$E(\Delta T_{ij}) \geq E(ROT_i) + E\left(\frac{\delta_d}{v_j}\right) + (n-1)E(TD_k) + B_{TOi}$$

Donde:

$E(ROT_i)$ : Estimación de tiempo de ocupación en pista (ROT) del avión que acaba de aterrizar.

$E\left(\frac{\delta_d}{v_j}\right)$ : Estimación de la separación que existirá entre un despegue y el siguiente aterrizaje en base a una distancia mínima operacional.

$(n-1)E(TD_k)$ : Número de despegues que se pueden meter teniendo en cuenta la estimación de tiempo para realizar un despegue.

$B_{TOi}$ : Al igual que en los casos anteriores, también se considera un margen de tiempo adicional.

Una vez que se han hallado los posibles huecos entre aterrizajes en la matriz  $(T_{ij} + B_{ij})$ , la cual define la distribución de tiempo entre llegadas, se construye la matriz  $h_{ij}$ , cuyas componentes corresponden a los despegues que se podrán realizar en función de la secuencia de llegadas. Una vez realizado esto, la capacidad en salidas con prioridad 100% llegadas para operaciones mixtas viene dada por la expresión:

$$C_{salidas}(Prioridad\ 100\%\ llegadas) = \sum_i \sum_j h_{ij} p_{ij} (C_{llegadas} - 1)$$

En el caso real ocurre exactamente esto. En aeropuertos donde sólo se disponga de una pista, o se tengan varias pistas con restricciones que hacen que sólo se pueda emplear una de ellas, la prioridad siempre estará del lado de las llegadas, mientras que las salidas son programadas en los huecos que se producen entre llegadas. Es aquí donde se encuentra el primer cuello de botella dentro del flujo de operaciones de las aeronaves dentro del campo de vuelo, pues puede darse el caso en el que se tenga un gran número de llegadas y salidas, los cuales no pueden ser absorbidos por la pista de manera efectiva y se crean retrasos que irán aumentando con el paso de las horas.

#### B.4. Metodología empleada en los cálculos de la Capacidad Práctica

El patrón de demanda de aeronaves influye directamente en el nivel de demora del sistema de pistas destinadas a abastecer dicha demanda. Por ello, cuanto mayor sea la cantidad de aeronaves que pretendan aterrizar en una pista, mayor será el nivel de demora, estableciéndose una relación exponencial creciente entre ellos. Esto se puede explicar en que, para un mismo valor de salidas, si se aumenta el número de llegadas, los huecos de tiempo entre aeronaves serán menores, lo que se traduce en menores intervalos de tiempo en los que la pista está disponible para las salidas.

Todo esto queda expresado gráficamente en la siguiente figura.

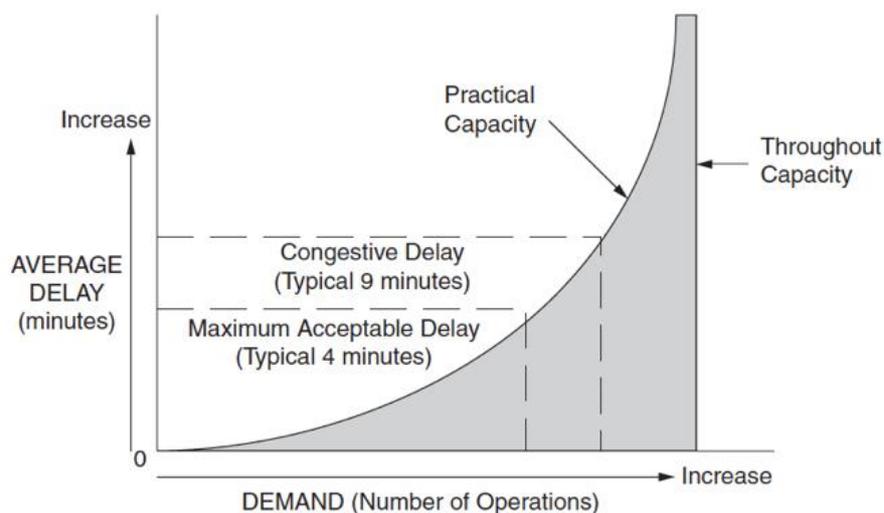


Figura B-3. Diagrama demanda-retraso medio. Fuente:[2].

La Capacidad de una pista crece hasta llegar a un valor máximo, conocido como Capacidad de Saturación (Throughout Capacity), caracterizado en que la pista no puede absorber más tráficos y el Nivel de Demora o el tiempo de espera para hacer uso de la pista por parte de una aeronave, tiende a infinito. En cambio, con un pequeño descenso del número de operaciones se obtienen niveles de demora más aceptables (Practical Capacity).

El nivel de demora que podría considerarse como aceptable, según numerosos estudios de capacidad publicados, se podría considerar que ronda los 10 minutos. Este valor es el que se emplea en la elaboración de numerosos planes directores por parte de consultoras, explotadores aeroportuarios, autoridades de aviación y expertos de la aviación, tales como FAA y Aena.

Se parte en primer lugar de la suposición de que el proceso de cola de un grupo de aeronaves usuarias de una pista en concreto es estacionario, siguiendo una disciplina de cola M/G/1, lo que se traduce en que las aeronaves siguen una distribución de Poisson y que la pista, que en este caso es el prestador de servicios, es un servidor único que sigue una distribución de tipo General. Esto hace que sean necesarios dos parámetros para la definición del comportamiento del servidor, a saber:

- Media.
- Desviación estándar.

El servidor quedará definido por los datos calculados en la Capacidad de Saturación: Tiempo esperado en gestionar aeronaves, definido como  $\mu$ , y su Desviación típica, definido como  $\sigma$ . Para averiguar el tiempo esperado de demoras por operación, se utilizará el modelo proporcionado por la fórmula de Pollaczek-Khinchine:

$$W_q = \frac{\lambda \left( \sigma^2 + \left( \frac{1}{\mu} \right)^2 \right)}{2(1 - \lambda/\mu)}$$

Donde:

$W_q$ : Tiempo esperado de demoras.

$\lambda$ : Demanda de despegues o aterrizajes.

$\mu$  y  $\sigma$ : Datos que definen a la pista como servidor. Son el tiempo esperado en gestionar una aeronave y su desviación típica, respectivamente.

## C. CAPACIDAD DEL ÁREA DE MOVIMIENTO

Para poder dar una solución lo más adecuada posible a la situación actual y futura del aeropuerto, será necesario realizar un estudio de la capacidad con la que cuenta el área de movimiento en su estado actual añadiendo la existencia de la nueva terminal, las nuevas calles de rodaje y la nueva pista de aterrizaje. Como no se tienen datos reales de la capacidad aeroportuaria, se procederá a estimar la misma a través de diversos documentos normativos que facilitan dicho cálculo. En el Anexo pueden consultarse tanto la fundamentación de los cálculos como el desarrollo de los mismos, extrayendo en este capítulo lo esencial para poder realizar el dimensionamiento geométrico de la plataforma de estacionamiento de aeronaves que se pretende proyectar.

Se comenzará por el cálculo de capacidad de la pista que existe actualmente, la 15/33. Esto será de utilidad para conocer la capacidad actual con la que cuenta el campo de vuelo a nivel operativo, es decir, a conocer cuántas operaciones es capaz de absorber la pista. Posteriormente, se tomará uno de los métodos descritos anteriormente para obtener la capacidad del campo de vuelo con la existencia de las dos pistas.

### C.1. Capacidad del Sistema de Pistas actual

Actualmente, el aeropuerto dispone de una única pista, la 15/33. En este caso, las llegadas y las salidas se realizan evidentemente por la misma pista y los puestos de estacionamiento se encuentran próximos a esta pista. Para obtener la capacidad actual se hace uso de los cálculos de capacidad de operaciones mixtas.

Para el cálculo de la capacidad de la pista será necesario suponer que se producen un tipo determinado de tráfico, los cuales se detallan en la siguiente tabla:

Tabla C-1. Mezcla, velocidad de aproximación y tiempo de ocupación en pista de los tipos de aeronaves que operan en el aeropuerto. *Elaboración propia.*

Tipo	Mezcla (%)	Velocidad de aproximación [kts]	Tiempo de ocupación en pista [sg]
H	30	140	60
L	50	120	55
S	20	100	50

Se estima que el 50 % de las aeronaves que operan en el aeropuerto son aeronaves grandes, es decir, las aeronaves de medio alcance tipo A320 y B737. Resulta una buena aproximación pues la mayoría de los tráfico que se producen en el aeropuerto son de este tipo. Seguidamente se estima un 30 % de aeronaves muy grandes y pesadas, teniendo en cuenta que el aeropuerto Jorge Chávez es de carácter internacional y es empleado por aeronaves de largo alcance. El resto de los tráfico lo completan las aeronaves pequeñas. Las

velocidades de aproximación suponen la media de varios modelos de cada tipo, así como los tiempos de coupación en pista, que para los cuales ha sido necesario la consulta de distintos datos de tráfico facilitados por Aena.

Además de esto, es necesario conocer la separación que se debe de dar entre las aproximaciones de cada tipo de aeronaves, recogidas en la siguiente tabla. Estas separaciones las exige normalmente el ATC:

Tabla C-2. Separación mínima longitudinal exigida por el ATC [en nm]. *Elaboración propia.*

	H	L	S
H	4	5	6
L	3	3	4
S	3	3	3

Para los cálculos también se necesita el período de barrido del radar de vigilancia, que se estima en unos 20 segundos, una probabilidad de violación del 5 % y una fase final de aproximación de 5 nm. Siguiendo los pasos expresados anteriormente cuando se expuso la metodología de cálculo de las operaciones independientes, se procede a calcular la matriz de tiempos  $T_{ij}$ :

$$T_{11} = \max \left[ \frac{s_{11}}{v_1}, o_1 \right] = \max \left[ \frac{4 \text{ nm}}{140 \text{ kts}}, 60 \text{ sg} \right] = \max \left[ \frac{4 \text{ nm}}{140 \text{ kts} \left( \frac{\text{nm}}{\text{hr}} \right) \cdot \frac{\text{hr}}{3600 \text{ sg}}}, 60 \text{ sg} \right]$$

$$= \max[103, 60] = 103 \text{ sg}$$

$$T_{12} = \max \left[ \frac{n + s_{12}}{v_2} - \frac{n}{v_1}, o_1 \right] = \max \left[ \frac{10 \text{ nm}}{120 \text{ kts}} - \frac{5 \text{ nm}}{140 \text{ kts}}, 60 \text{ sg} \right] = \max[171, 60] = 171 \text{ sg}$$

$$T_{13} = \max \left[ \frac{n + s_{13}}{v_3} - \frac{n}{v_1}, o_1 \right] = \max \left[ \frac{11 \text{ nm}}{100 \text{ kts}} - \frac{5 \text{ nm}}{140 \text{ kts}}, 60 \text{ sg} \right] = \max[216, 60] = 216 \text{ sg}$$

$$T_{21} = \max \left[ \frac{n + s_{21}}{v_1} - \frac{n}{v_2}, o_2 \right] = \max \left[ \frac{8 \text{ nm}}{140 \text{ kts}} - \frac{5 \text{ nm}}{120 \text{ kts}}, 55 \text{ sg} \right] = \max[, 55] = \text{sg}$$

$$T_{22} = \max \left[ \frac{s_{22}}{v_2}, o_2 \right] = \max \left[ \frac{3 \text{ nm}}{120 \text{ kts}}, 55 \text{ sg} \right] = \max[, 55] = \text{sg}$$

$$T_{23} = \max \left[ \frac{n + s_{23}}{v_3} - \frac{n}{v_2}, o_2 \right] = \max \left[ \frac{9 \text{ nm}}{100 \text{ kts}} - \frac{5 \text{ nm}}{120 \text{ kts}}, 55 \text{ sg} \right] = \max[, 55] = \text{sg}$$

$$T_{31} = \max \left[ \frac{n + s_{31}}{v_1} - \frac{n}{v_3}, o_3 \right] = \max \left[ \frac{8 \text{ nm}}{140 \text{ kts}} - \frac{5 \text{ nm}}{100 \text{ kts}}, 50 \text{ sg} \right] = \max[, 50] = \text{sg}$$

$$T_{32} = \max \left[ \frac{n + s_{32}}{v_2} - \frac{n}{v_3}, o_3 \right] = \max \left[ \frac{8 \text{ nm}}{120 \text{ kts}} - \frac{5 \text{ nm}}{100 \text{ kts}}, 50 \text{ sg} \right] = \max[, 50] = \text{sg}$$

$$T_{33} = \max \left[ \frac{s_{33}}{v_3}, o_3 \right] = \max \left[ \frac{3 \text{ nm}}{100 \text{ kts}}, 50 \text{ sg} \right] = \max[, 50] = \text{sg}$$

$$T_{ij} = \begin{bmatrix} 103 & 171 & 216 \\ 56 & 90 & 174 \\ 50 & 60 & 108 \end{bmatrix}$$

Se pasa a calcular la matriz de buffers,  $B_{ij}$ .

$$B_{ij} = \begin{bmatrix} 33 & 11.5 & 0 \\ 33 & 33 & 9 \\ 33 & 33 & 33 \end{bmatrix}$$

Con esto, la matriz de tiempos totales.

$$T_{ij} + B_{ij} = \begin{bmatrix} 136 & 182.5 & 216 \\ 89 & 123 & 183 \\ 83 & 93 & 141 \end{bmatrix}$$

Para determinar la matriz de probabilidades, se realiza la suposición de que los aviones van aterrizando según van llegando.

- $p_{11}$ : probabilidad de un avión tipo H vaya detrás de otro tipo H.  $p_{11} = 0.3 \cdot 0.3 = 0.09$
- $p_{12}$ : probabilidad de un avión tipo L vaya detrás de otro tipo H.  $p_{12} = 0.3 \cdot 0.5 = 0.15$
- $p_{13}$ : probabilidad de un avión tipo S vaya detrás de otro tipo H.  $p_{13} = 0.3 \cdot 0.2 = 0.06$

$$p_{ij} = \begin{bmatrix} 0.09 & 0.15 & 0.06 \\ 0.15 & 0.25 & 0.1 \\ 0.06 & 0.1 & 0.04 \end{bmatrix}$$

El tiempo medio entre llegadas,  $E(t)$ , se obtendrá mediante la multiplicación de los elementos correspondientes de las matrices  $(T_{ij} + B_{ij})$  y  $p_{ij}$ .

$$E(t) = 134.89 \text{ sg}$$

De acuerdo con estos datos, la capacidad horaria de la pista será:

$$C_{pista} = \frac{3600 \text{ sg}}{134.89 \text{ sg}} = 26.7 \cong 27 \text{ aeronaves}$$

Esta capacidad de la pista está fuertemente influenciada por las hipótesis que se han considerado, como la mezcla de tráfico que se produce, o el tiempo de barrido de radar. Cabe decir que cualquier cambio en algunas de las variables haría que se incrementara la capacidad de la pista o se redujera. Aceptando las hipótesis consideradas, puede decirse que la pista 15/33 es capaz de absorber un total de 27 operaciones por hora.

## C.2. Capacidad del Sistema de Pistas futuro

Como se mencionó anteriormente, existe la posibilidad de considerar las operaciones como segregadas o independientes. Para enfocar y esclarecer todos los resultados que ayuden a comprender mejor las diferencias entre optar por una solución o por otra, se calculará la capacidad del sistema de pistas en ambas situaciones.

### C.2.1. Capacidad en configuración de operaciones segregadas

En este caso es necesario considerar que una pista sea la encargada de absorber todas las llegadas y otra que esté disponible para la totalidad de las salidas. En este sentido, se va a considerar que la pista actual va a ser la destinada a las llegadas y la nueva a salidas (en el caso contrario se obtendrían los mismos resultados). Cabe mencionar previamente a la realización de los cálculos que el hecho de considerar alguna de estas configuraciones, implica que las aeronaves que aterricen en la nueva pista o vayan a despegar en ella, y que estén estacionados en la plataforma actual, deberán atravesar la pista actual. Esto se traduce en un tiempo de ocupación en pista superior al que se considera en estos casos, además de que la rodadura por el campo de vuelo en este caso es extensa (tiene que cruzar prácticamente la totalidad del campo de vuelo).

La actual pista, la 15/33, pasará a denominarse la pista 15L/33R, mientras que la nueva será la 15R/33L. La configuración que se va a considerar de aproximaciones y despegues será la configuración que se empleó en el caso del cálculo de capacidad de la pista actual, es decir, la configuración Noreste, por las razones expuestas anteriormente. Se procede al cálculo de la capacidad del sistema de pistas en condición de operaciones segregadas:

El tiempo medio de cualquier aeronave durante la operación de aterrizaje es:

$$E(t) = 83.55 \text{ s}$$

La Capacidad de Saturación en estas operaciones será la inversa del tiempo medio.

$$C_{salidas\ 33R} = \frac{1}{E(t)} = 43 \text{ salidas/hora}$$

La varianza de los tiempos medios –diferencia entre tiempos estimados por operación para diferentes tipos de aeronaves- y la desviación típica son:

$$\begin{aligned}\sigma_t^2 &= 406.14 \text{ s}^2 \\ \sigma &= 20.15 \text{ s}\end{aligned}$$

El tiempo estimado de demora viene dado por la fórmula de Pollaczek-Khinchine:

$$W_d = \frac{\lambda_d \left( \sigma_d^2 + \left( \frac{1}{\mu_d} \right)^2 \right)}{2 \left( 1 - \frac{\lambda_d}{\mu_d} \right)}$$

Con:

$W_d$ : Tiempo esperado de demoras.

$\lambda_d$ : Número de salidas por hora.

$\mu_d$ : Capacidad de saturación.

$\sigma_d$ : Desviación típica.

Los resultados que se obtienen de la fórmula para distintas consideraciones de llegadas por hora:

Tabla C-3. Número de salidas por hora y demoras correspondientes. *Elaboración propia.*

$\lambda_d$ (Salidas por hora)	$W_d$ (min)
38	5.61
39	7.20
40	9.84
41	15.13
42	31
43	$\infty$

Considerando una demora máxima de 10 minutos, el valor de salidas por hora óptimo sería de 39 salidas.

$$C_{salidas} = 39 \text{ salidas/hora}$$

Se pasa ahora a obtener la capacidad del sistema de pistas en llegadas, con la pista actual como disponible para este tipo de operaciones. En este caso, el tiempo medio obtenido por operación de aterrizaje, para cualquier modelo de aeronave, es:

$$E(t) = 95.31 \text{ s}$$

Con esto, la capacidad de saturación, la varianza y la desviación típica son:

$$C_{llegadas15L} = \frac{1}{E(t)} = 37 \text{ salidas/hora}$$

$$\sigma_t^2 = 1125 \text{ s}^2$$

$$\sigma = 33.54 \text{ s}$$

Aplicando la fórmula de Pollaczek-Khinchine:

Tabla C-4. Número de llegadas por hora y demoras correspondientes. *Elaboración propia.*

$\lambda_a$ (Llegadas por hora)	$W_a$ (min)
31	4.69
32	5.81
33	7.48
34	10.28
35	15.88
36	32.66
37	$\infty$

Considerando una demora máxima de 10 minutos, el valor de llegadas por hora óptimo sería de 33 llegadas. Considerando un 5 % menos de operaciones debido a la ocupación de la pista por parte de las aeronaves que la cruzan buscando la otra pista, se obtiene un total de:

$$C_{salidas} = 33 \cdot 0.95 = 31 \text{ llegadas/hora}$$

Además de esto, en estos datos no entra en juego el hecho de que la aeronave que se encuentre estacionada en la plataforma actual deba atravesar todo el campo de vuelo, hecho que resulta notable destacar debido a la cantidad de tiempo que la aeronave se encuentra rodando por el campo de vuelo, provocando congestión de tráfico y posibles incidencias con el rodaje de otras aeronaves. Sin tener en cuenta este dato, se obtiene:

Tabla C-5. Operaciones en condición de operaciones segregadas. *Elaboración propia.*

Salidas 15R/33L por hora	Llegadas 15L/33R por hora
39	31

### C.2.2. Capacidad en configuración de operaciones mixtas

A continuación, se procederá a obtener la capacidad del sistema de pistas considerando que cada pista es independiente una de la otra. En este caso, se hará la siguiente suposición: Se destinará la pista actual a dar servicio a gran parte de las operaciones relacionadas con los aviones menos pesados y de medio radio, es decir, aeronaves hasta del tipo C. Además de esto, se dejará lugar a un pequeño uso de esta pista por parte de aeronaves pesadas o de largo alcance, aunque preferentemente harán uso de la nueva pista. Esto se traducirá en la matriz de tiempos, pues se considerará una mezcla distinta a la considerada anteriormente:

Se comienza con el cálculo de la capacidad de la pista 15R/33L, la actual. En la siguiente tabla se recogen los datos de mezcla considerados en la suposición realizada:

Tabla C-6. Mezcla, velocidad de aproximación y tiempo de ocupación en pista de los tipos de aeronaves que operan en la pista 15R/33L. *Elaboración propia.*

Tipo	Mezcla (%)	Velocidad de aproximación	Tiempo de ocupación en pista
H	5	140	60
L	70	120	55
S	25	100	50

Se le da prioridad de uso a las aeronaves de corto y medio radio, contemplado el uso de la misma por parte de aeronaves más pesadas en algunos casos. Siguiendo la metodología de cálculo para el caso actual, se tiene los siguientes resultados.

$$T_{ij} = \begin{bmatrix} 103 & 171 & 216 \\ 56 & 90 & 174 \\ 50 & 60 & 108 \end{bmatrix}$$

$$B_{ij} = \begin{bmatrix} 33 & 11.5 & 0 \\ 33 & 33 & 9 \\ 33 & 33 & 33 \end{bmatrix}$$

$$T_{ij} + B_{ij} = \begin{bmatrix} 136 & 182.5 & 216 \\ 89 & 123 & 183 \\ 83 & 93 & 141 \end{bmatrix}$$

$$p_{ij} = \begin{bmatrix} 0.0025 & 0.035 & 0.0125 \\ 0.035 & 0.49 & 0.175 \\ 0.0125 & 0.175 & 0.0625 \end{bmatrix}$$

$$E(t) = 130.96 \text{ sg}$$

Con esto, la capacidad de operaciones de la pista 15R/33L será.

$$C_{33L/15R} = \frac{3600}{130.96} = 27.48 \cong 27 \text{ aeronaves}$$

Procediendo de la misma manera para la otra pista, pero con la suposición de que será prioritaria para aeronaves pesadas, se tiene:

Tabla C-7. Mezcla, velocidad de aproximación y tiempo de ocupación en pista de los tipos de aeronaves que operan en la pista 15R/33L. *Elaboración propia.*

Tipo	Mezcla (%)	Velocidad de aproximación	Tiempo de ocupación en pista
H	70	140	60
L	25	120	55
S	5	100	50

$$T_{ij} = \begin{bmatrix} 103 & 171 & 216 \\ 56 & 90 & 174 \\ 50 & 60 & 108 \end{bmatrix}$$

$$B_{ij} = \begin{bmatrix} 33 & 11.5 & 0 \\ 33 & 33 & 9 \\ 33 & 33 & 33 \end{bmatrix}$$

$$T_{ij} + B_{ij} = \begin{bmatrix} 136 & 182.5 & 216 \\ 89 & 123 & 183 \\ 83 & 93 & 141 \end{bmatrix}$$

$$p_{ij} = \begin{bmatrix} 0.49 & 0.175 & 0.035 \\ 0.175 & 0.0625 & 0.0125 \\ 0.035 & 0.0125 & 0.0025 \end{bmatrix}$$

$$E(t) = 139.28 \text{ sg}$$

Con esto, la capacidad de operaciones de la pista 15L/33R será.

$$C_{33L/15R} = \frac{3600}{139.28} = 25.84 \cong 25 \text{ aeronaves}$$

La capacidad del sistema de pistas en configuración de operaciones mixtas quedaría de la siguiente manera:

Tabla C-8. Operaciones en condición de operaciones independientes. *Elaboración propia.*

Pista 15L/33R	Pista 15R/33L
27	25

### C.2.3. Capacidad de la plataforma de estacionamiento

Para la obtención de la capacidad de la Plataforma de estacionamiento es preciso estimar el número de aeronaves que solicitan una posición de estacionamiento.

Si se tiene en cuenta que una operación puede ser o bien de despegue o bien de aterrizaje, si se divide el número de operaciones anuales por la mitad, se obtiene una aproximación de las aeronaves que han estacionado durante ese año en el aeropuerto. Esto tiene en cuenta la hipótesis de que, durante un mismo año, el mismo número de aeronaves que llegan es el mismo que se va, fundamentado principalmente en el número de salidas y llegadas al aeropuerto Jorge Chávez, muy próximos el uno del otro.

Tabla C-9. Tráfico de aeronaves y porcentaje del total del año 2017. *Fuente: lima-airport.com*

Tipo	Número de aeronaves	%
I	392	0.42
II	3.979	4.26
III	1.251	1.34
IV	1.064	1.14
V	93	0.01
VI	65.874	70.52
VII	11.377	12.18
VIII	9.453	10.12

A continuación, se procede a la estimación del tiempo de estancia en un puesto. Esta información no está disponible para consulta, por lo que se optará por la mediana de los tiempos publicados en los Planos Directores de distintos aeropuertos españoles. El uso de la mediana y no el de la media es frecuente en la elaboración de los Planes Directores, además de que cuenta con la ventaja de descartar valores extremos que no sean representativos dentro de una serie de datos.

Tabla C-10. Tiempo medio de estancia en un puesto de estacionamiento de cada tipo de aeronave. *Fuente: Planes directores de varios aeropuertos.*

Tipo	Aeronaves usuarias	Tiempo [min]
I	B747, A380	81
II	A330	84
III	B767-300, B757-300	70
IV	B757-200	67
V	B727, MD82	58
VI	B737-800, A320	54
VII	CRJ-900	52
VIII	ATR-72, ATR-42	39

En base a esto, la siguiente tabla recoge todos los datos de partida y los cálculos de los parámetros referidos anteriormente.

Tabla C-11. Datos de cálculo de capacidad. *Elaboración propia.*

Tipo	$P_i$	$M_i$	$T_i$	$p_i$	$M_i T_i$	$t_i$	$X_i$
I	3	0.42	81	0.054	5.7 e-4	6.37 e-4	84.77
II	3	4.26	84	0.054	0.059	0.067	1.59
III	20	1.34	70	0.364	0.016	0.018	5.51
IV	2	1.14	67	0.036	0.013	0.014	5.10
V	1	0.01	58	0.018	9.66 e-5	1.08e-4	5.27
VI	22	70.52	54	0.402	0.635	0.709	1.15
VII	1	12.18	52	0.018	0.105	0.117	1.02
VIII	3	10.12	39	0.054	0.066	0.074	1
Total	55	100	-	1	0.895	1	-

De esto se deduce que la capacidad de estacionamiento es de:

$$F = \frac{\sum P_i}{\sum M_i T_i} = 61 \text{ aeronaves/hora}$$

En la situación actual, se obtiene una capacidad preliminar del estacionamiento de:

$$C = FX_{min} = 61 \text{ aeronaves/hora}$$

Seguidamente se estima el valor del número de llegadas sobre el total de las operaciones para el día punta de operaciones:

$$\% \text{ Llegadas} = \frac{425 \text{ llegadas}}{845 \text{ operaciones comerciales}} \cdot 100 = 50.29 \%$$

Debido al hecho de que los puestos de estacionamiento no son ocupados inmediatamente después de ser abandonados por una nave, es necesario estimar el factor de utilización que, en caso de que no se tenga ninguna información al respecto, el operador aeroportuario sugiere un 80 % de utilización. Entonces:

$$C = \frac{FX_{min}U}{\% \text{ Llegadas}} = 97 \text{ aeronaves/hora}$$

Para la obtención de este valor se ha considerado que la totalidad de los puestos de estacionamiento cuentan con disponibilidad. Esto no se cumple en los casos en los que se tenga una aeronave estacionada con carácter de larga duración o en ocasiones en las que, debido a desarrollo de trabajos en las cercanías o de mantenimiento de los propios puestos, casos en los que el puesto de estacionamiento no está disponible. Por esta razón, este valor de capacidad puede considerarse una cota superior del mismo, siendo en la realidad menor.

# REFERENCIAS

---

[1] Millán Muñoz, R., «Apuntes de la asignatura *Planificación y Diseño de Aeropuertos*», 2014.

[2] Horonjeff, R. et al, « *Planning and Design of Airports*», 2010.



# Trabajo Fin de Máster

## Máster en Ingeniería Aeronáutica

### Anexo B: Pavimentos

Autor: Manuel Jesús Ibáñez Tirado

Tutor: Jorge Juan Fernández de la Cruz

**Dpto. Construcción y Proyectos de Ingeniería**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019







Trabajo Fin de Máster  
Máster en Ingeniería Aeronáutica

## **Anexo B: Pavimentos**

Autor:

Manuel Jesús Ibáñez Tirado

Tutor:

Jorge Juan Fernández de la Cruz

Profesor asociado

Dpto. Construcción y Proyectos de Ingeniería

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



# Índice

---

<b>Índice</b>	<b>4</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>6</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>8</b>
<b>A. Introducción</b>	<b>10</b>
<b>B. Pavimentos aeronáuticos</b>	<b>12</b>
<i>B.1. Metodología</i>	12
<i>B.2. Datos previos</i>	12
B.2.1. Datos de tráfico	12
B.2.2. Datos geotécnicos	14
<i>B.3. Cálculo del pavimento</i>	15
B.3.1. Soluciones constructivas consideradas	15
B.3.2. Pavimento de losas de hormigón	16
B.3.3. Pavimento flexible	17
B.3.4. Márgenes pavimentados de calles de rodaje	17
<b>C. PCN de los pavimentos aeronáuticos diseñados</b>	<b>22</b>
<i>C.1. Método estandarizado ACN-PCN</i>	22
<i>C.2. Metodología FAA</i>	22
C.2.1. Tipo de pavimento	23
C.2.2. Categoría de la subrasante	23
C.2.3. Presión de inflado	23
C.2.4. Tipo de evaluación	24
C.2.5. Ejemplo de reporte de PCN	24
<i>C.3. Resultados ACN-PCN</i>	24
C.3.1. Pavimento rígido	25
C.3.2. Pavimento flexible	28
<b>Referencias</b>	<b>32</b>



# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla B–1. Serie histórica. Tráfico de aeronaves.	13
Tabla B–2. Serie histórica. Tráfico de aeronaves.	13
Tabla C–1. Tipos de transmisión y frecuencia central. <i>Fuente: FAA.</i>	23
Tabla C–2. Tipo de pavimento y código asignado. <i>Fuente: FAA.</i>	23
Tabla C–3. Categoría de la subrasante. <i>Fuente: FAA.</i>	23
Tabla C–4. Categorías de presión de inflado de los neumáticos. <i>Fuente: FAA.</i>	23



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura B-1. Extracto de FAARFIELD con solución de pavimento rígido. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	16
Figura B-2. Espesores de losas y juntas. <i>Fuente: FAA.</i>	16
Figura B-3. Extracto de FAARFIELD con solución de pavimento flexible. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	17
Figura B-4. Extracto informativo sobre márgenes de calles de rodaje. <i>Fuente: OACI.</i>	18
Figura B-5. Extracto de FAARFIELD con solución de pavimento de margen. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	18
Figura C-1. Extracto de Excel de COMFAA con datos de pavimento rígido. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	25
Figura C-2. Extracto de COMFAA, señalando la flota, las características de la subrasante y el espesor de evaluación extraído del Excel. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	26
Figura C-3. Extracto de resultados tras evaluación en COMFAA para pavimento rígido. Tabla 1: Datos de tráfico. Indicación de espesor adecuado. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	26
Figura C-4. Extracto de resultados tras evaluación en COMFAA de pavimento rígido. Tabla 2: Valores de PCN. Indicación de PCN superior alcanzado. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	27
Figura C-5. Extracto de resultados tras evaluación en COMFAA de pavimento rígido. Tabla 3: Valores de ACN. Indicación de ACN superior alcanzado. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	27
Figura C-6. Extracto de Excel de COMFAA con datos de pavimento flexible. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	28
Figura C-7. Extracto de resultados tras evaluación en COMFAA para pavimento flexible. Tabla 1: Datos de tráfico. Indicación de espesor adecuado. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	28
Figura C-8. Extracto de resultados tras evaluación en COMFAA de pavimento flexible. Tabla 2: Valores de PCN. Indicación de PCN superior alcanzado. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	29
Figura C-9. Extracto de resultados tras evaluación en COMFAA de pavimento flexible. Tabla 3: Valores de ACN. Indicación de ACN superior alcanzado. <i>Fuente: Elaboración propia.</i>	29



# A. INTRODUCCIÓN

---

El objeto del presente anexo es describir los cálculos realizados para determinar las secciones de pavimento a ejecutar en la construcción de la plataforma que contempla el presente Trabajo.

Para su obtención, será necesario hacer uso de la Normativa vigente en materia de firmes aeroportuarios, siguiendo las directrices de los entes reguladores, como son OACI y FAA. Este último pone a disposición de todos los usuarios una serie de programas de simulación informáticos que son de tremenda importancia a la hora de realizar el dimensionamiento del paquete de firmes, ya sea para pavimentos rígidos como flexibles.



# B. PAVIMENTOS AERONÁUTICOS

---

## B.1. Metodología

Los pavimentos aeronáuticos de Aeropuertos internacionales se rigen por la normativa y recomendaciones de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), cuyos principios básicos se estipulan en el Anexo 14 al Convenio de Chicago y se desarrollan en el Manual de Diseño de Aeródromos, Parte 3 (doc. 9157) [1]. Dicho Manual indica la práctica seguida en diversos países, y de entre los métodos recomendados, en general se remite a los de EE. UU., definidos en el AC/150/5320 [2] de la Federal Aviation Administration (FAA). En la actualidad, el método aplicado por FAA se desarrolla mediante programas informáticos (COMFAA, y Rigid and Flexible Iterative Elastic Layer Design (FAARFIELD)), software que ha sustituido al cálculo basado en gráficas incluido hasta el año 2009 en el mencionado AC/150/5320 y adoptado por ICAO. Ambas metodologías aportan en general valores muy similares.

## B.2. Datos previos

### B.2.1. Datos de tráfico

El cálculo de pavimentos se realizará para una duración mínima de 20 años, tal y como estipula la normativa mencionada anteriormente. Los cálculos requieren de la estimación de la flota y el número de operaciones en ese período de 20 años, y para ello es necesario realizar unas previsiones de operaciones distinguiendo los tipos de aeronaves.

Para distinguir los tipos de aeronaves se ha contado con el listado de vuelos comerciales regulares del año 2018; siendo el segmento más característico del tráfico, se ha contado con este dato para conocer el reparto entre los principales modelos que operan en el aeropuerto, obteniéndose los resultados de la tabla B-1.

Considerando que la mitad del total de las operaciones anuales son salidas, de media, se obtiene un total de 18.094 salidas del modelo mayoritario, que es el Boeing 737-800. Esta aeronave no tiene por qué coincidir con el modelo crítico de diseño, que resultará ser aquél que más le va a exigir al pavimento a nivel estructural. De hecho, como se apreciará más adelante, no lo es.

Además, será necesario tener en cuenta qué pesos serán los que van a ser considerados para la obtención del paquete de firme, consideración que depende de la distancia y los destinos que cubren regularmente.

Tabla B-1. Serie histórica. Tráfico de aeronaves.

Modelo	Total (Salidas y Llegadas)	Porcentaje
Boeing 737-800 (Winglets) Pass	36.189	19 %
Airbus A320 Passenger	26.643	14 %
Airbus A319	18.091	9.6 %
Airbus A321	14.771	7.9 %
Bombardier Regional JET-1000	14.623	7.8 %
Airbus A320 (Sharklets)	12.131	6.5 %
Embraer ERJ-195, Legancy 1000	9.112	4.8 %
Airbus A330-200	7.407	3.9 %
Aerospatiale ATR-72	5.914	3.1 %
Boeing 787-8	3.987	2.1 %
Airbus A340-600	3.675	1.9 %
Airbus A330-300	3.456	1.8 %
TOTAL	186.826	100 %

La mayoría de las aeronaves se emplean para destinos situados a distancias cortas-medias, como son el caso de las aeronaves que más operaciones realizan en el aeropuerto. Las distancias largas se reservan para aquellas aeronaves de mayor tamaño, como el modelo A330 de Airbus. Por ello, una solución intermedia sería la de no considerar el peso máximo de la aeronave para obtener la distribución del paquete de firme. En este caso, desde el punto de vista de la seguridad se va a considerar el peso máximo de cada aeronave.

Tabla B-2. Serie histórica. Tráfico de aeronaves.

Modelo	Salidas medias anuales	MTOW [kg]
Boeing 737-800 (Winglets) Pass	36.189	79.000
Airbus A320 Passenger	26.643	78.000
Airbus A319	18.091	75.500
Airbus A321	14.771	93.500
Bombardier Regional JET-1000	14.623	41.640
Airbus A320 (Sharklets)	12.131	78.000
Embraer ERJ-195, Legancy 1000	9.112	52.290
Airbus A330-200	7.407	233.000
Aerospatiale ATR- 72	5.914	23.000
Boeing 787-8	3.987	250.836
Airbus A340-600	3.675	380.000
Airbus A330-300	3.456	233.000

### B.2.2. Datos geotécnicos

Debido a que el presente Trabajo cuenta con un marcado carácter académico, no se tienen datos exactos de las características del terreno de fundación de la plataforma. Es por ello por lo que se va a suponer unas características del terreno aproximadas a las que en la realidad puede tener el terreno en cuestión. Como punto de partida, se va a considerar que se obtiene un CBR de cálculo para el terreno de fundación no inferior a CBR10.

Las características que se ha considerado de terreno son poco ventajosas a la hora de ejecutar un paquete, traduciéndose en un valor de CBR bastante bajo para la mezcla de tráfico considerada. Para mejorar este aspecto, se puede:

- Tratar el propio terreno de fundación. Consistiría en añadir algún tipo de aditivo –cemento o cal- y proceder a realizar un riego y compactación del terreno, con lo que se produciría un incremento de las capacidades geotécnicas del mismo.
- Añadir material con unas características determinadas, perfectamente controladas. Se procedería con la compactación del terreno natural, el vertido del material seleccionado, el riego y de nuevo la compactación, alcanzando unos valores más favorables para la formación de la explanada sobre la que se ejecutará el paquete de pavimento.

La primera opción sería ventajosa en el caso de que se tenga plena información del terreno, para asegurar que no se producirá ningún tipo de reacción entre el terreno y el aditivo. Es por ello que se optará por la segunda opción, la cual puede controlarse de una manera más fácil y más eficaz.

Para ello, conociendo el CBR de fundación del terreno y el CBR que se pretende alcanzar en la coronación de explanada, mediante la formulación de Ivanov puede conocerse la cantidad y las características del material a aportar.

La formulación de Ivanov se basa en la siguiente expresión:

$$E_{1-2} = \frac{E_2}{1 - \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{1}{n^{3,5}}\right) \arctan \left(n \frac{h_1}{2a}\right)}$$

$$n = \sqrt[2,5]{\frac{E_1}{E_2}}$$

Donde:

$E_{1-2}$ : Módulo resiliente de la fundación equivalente, en MPa.

$E_2$ : Módulo resiliente de la subrasante, en MPa.

$E_1$ : Módulo resiliente del terraplén de mejora, en MPa.

$h_1$ : Espesor de la capa de mejora, en cm.

$a$ : Radio de carga, en cm.

$n$ : Relación modular.

Para la estimación del módulo resiliente a partir del CBR, se emplea la formulación de Bioenergy.

$$E = 130CBR^{0.714}$$

Dónde:

$E$ : Módulo resiliente, en kg/cm<sup>2</sup>.

*CBR*: California Bearing Ratio, en %.

Utilizando la formulación anterior, a partir del *CBR* se obtiene el módulo resiliente:

$$E_2 = 672.89 \frac{kg}{cm^2} = 65.99 MPa$$

$$E_1 = 898.82 \frac{kg}{cm^2} = 88.14 MPa$$

Con esto, resulta un valor del módulo resiliente de la fundación equivalente de:

$$E_{1-2} = 777.51 \frac{kg}{cm^2} = 76.25 MPa$$

Se obtiene que la mejora mínima a realizar sobre el terreno natural, caracterizado con un *CBR*10, para obtener una subrasante con *CBR*12 mínimo, es de 20 cm de material de préstamo con *CBR*15.

Para el dimensionamiento del pavimento rígido, resulta necesario obtener el valor del Módulo de Reacción de la Subrasante. Para ello, se acude a la información contenida en el AC/150/5320 de la FAA. Dentro del apartado 2.5 “Soil Strength Tests”, se extrae que, si el valor del *CBR* es conocido, puede obtenerse el valor de *K* a través de la siguiente fórmula de correlación:

$$k = \left[ \frac{(1500 \times CBR)}{20.15} \right]^{0.7788}$$

Donde *k* se obtiene en *pci* (pounds per cubic inch). La expresión anterior se obtiene de igualar las expresiones de obtención del Módulo Elástico del terreno, que para pavimentos flexibles viene expresado en función del *CBR* y para rígidos en función de la *K*. En este caso, para un *CBR* conocido de 12, se obtiene un valor de *K* de 53.94 MN/m<sup>3</sup>. Este valor supone una aproximación al valor real de *K* que se obtendría a partir de ensayos en campo, y será empleado para el cálculo del pavimento rígido.

## B.3. Cálculo del pavimento

### B.3.1. Soluciones constructivas consideradas

Las soluciones que se aplican para la plataforma serán:

- Pavimento de losas de hormigón para zonas de uso intensivo de aeronaves. Estas áreas corresponden sensiblemente con las posiciones de estacionamiento de aeronaves y equipos handling de su entorno.
- Pavimento flexible resistente para paso de aeronaves en la zona de conexión entre la calle de rodaje actual y nueva posición de estacionamiento.

Pavimento flexible de margen para la calle de rodaje y entrada a puesto de estacionamiento.

### B.3.2. Pavimento de losas de hormigón

Se plantea una solución idéntica a las que existen en gran parte de las plataformas de aeropuertos. La metodología de cálculo está basada en el programa de la FAA: FAARFIELD, con el tráfico considerado anteriormente y empleado para el resto de las actuaciones en el aeropuerto.

Se dispone de un valor de K de 53.94 MN/m<sup>3</sup> en la subrasante o terraplén. Con esto, los resultados que se obtienen es el equivalente a una losa de 35 cm de espesor y una base de 15 cm de suelo-cemento.

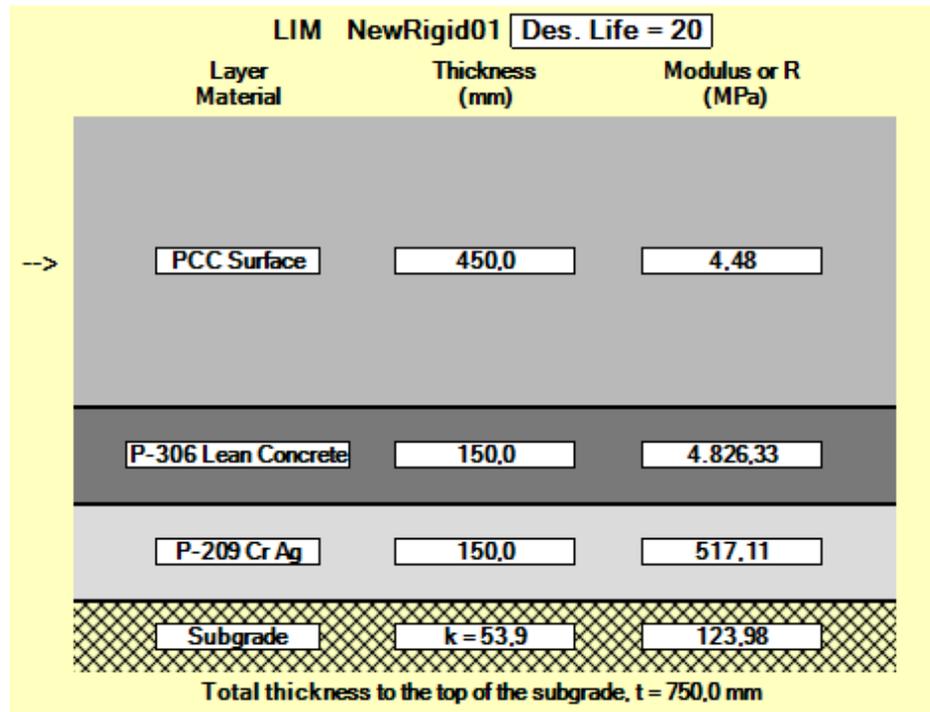


Figura B-1. Extracto de FAARFIELD con solución de pavimento rígido. Fuente: Elaboración propia.

El módulo será de 5x5 metros, adecuado al espesor de la losa como se deduce de la figura B-2.

Part II, with Stabilized Subbase			
Slab Thickness		Joint Spacing <sup>1</sup>	
Inches	Millimeters	Feet	Meters
8-10	203-254	12.5	3.8
10.5-13	267-330	15	4.6
13.5-16	343-406	17.5 <sup>2</sup>	5.3 <sup>2</sup>
>16	>406	20	6.1

Figura B-2. Espesores de losas y juntas. Fuente: FAA.

La figura muestra los espesores mínimos de las capas proyectadas. Por motivos de operatividad en la ejecución del firme y los espesores, se suelen aproximar a espesores que sean fácilmente ejecutables en obra. En este caso, el paquete será:

- Losa de hormigón de 35 cm.
- Base de material suelo-cemento de 15 cm.
- Subbase de zahorra artificial, que, según lo calculado anteriormente, resulta un espesor de 20 cm.

### B.3.3. Pavimento flexible

Realizando el cálculo para pavimento flexible para este mismo tráfico y partiendo de una explanada o terraplén que disponga de un valor de CBR 12, el resultado sería:

LIM AConFlex01 Des. Life = 20		
Layer Material	Thickness (mm)	Modulus or R (MPa)
P-401/P-403 HMA Surface	110,0	1.378,95
P-401/P-403 St (flex)	127,0	2.757,90
P-209 Cr Ag	300,0	451,02
Subgrade	CBR = 12,0	124,11

N = 2; Sublayers; Subgrade CDF = 1,00; t = 537,0 mm

Figura B-3. Extracto de FAARFIELD con solución de pavimento flexible. Fuente: Elaboración propia.

Por la misma razón que para el pavimento rígido, la distribución del paquete de firme flexible es el siguiente:

- Capa de rodadura. 4 cm de SMA 11 surf PMB 45/80-65 junto con fibras.
- Riego de adherencia ECR-1.
- Capa intermedia. 9 cm de M.B.B. Tipo AC 22 Bin 50/70.
- Riego de adherencia ECR-1.
- Base asfáltica. 15 cm de M.B.C. Tipo AC 32 base 50/70.
- Riego de imprimación ECI.
- Subbase. 30 cm de zahorra artificial.

### B.3.4. Márgenes pavimentados de calles de rodaje

En el Anexo 14 se incluyen las recomendaciones para el diseño de márgenes pavimentados de pista y calles de rodaje. Además, en el Manual de Diseño de Aeródromos Parte 2 se especifica que el margen de calles de rodaje debe ser capaz de soportar el peso de un avión que se saliera de la calle y de todos los vehículos de emergencia del Aeropuerto, lo que obliga a pavimentar los márgenes completos.

**1.6 TAXIWAY SHOULDERS AND STRIPS**

**General**

1.6.1 A shoulder is an area adjacent to the edge of a full strength paved surface so prepared as to provide a transition between the full strength pavement and the adjacent surface. The main purpose of the provision of a taxiway shoulder is: to prevent jet engines that overhang the edge of a taxiway from ingesting stones or other objects that might damage the engine; to prevent erosion of the area adjacent to the taxiway; and to provide a surface for the occasional passage of aircraft wheels. A shoulder should be capable of withstanding the wheel loading of the heaviest airport emergency vehicle. A taxiway strip is an area, including a taxiway, intended to protect an aircraft operating on the taxiway and to reduce the risk of damage to an aircraft accidentally running off the taxiway.

Figura B-4. Extracto informativo sobre márgenes de calles de rodaje. Fuente: OACI.

Cuando el aeródromo está previsto para aeronaves pesadas, el cálculo aeronáutico es más crítico que el de los vehículos del aeropuerto, por lo que se realizará el cálculo mediante el método propuesto por el AC 150/5320, que dedica su capítulo 7 al diseño de pavimentos de márgenes, incluyendo expresamente tanto los de pista como calles de rodaje. Dicho método consiste en calcular el pavimento para la flota prevista, pero con un solo movimiento anual de cada tipo de aeronave. El resultado en este caso es el siguiente:

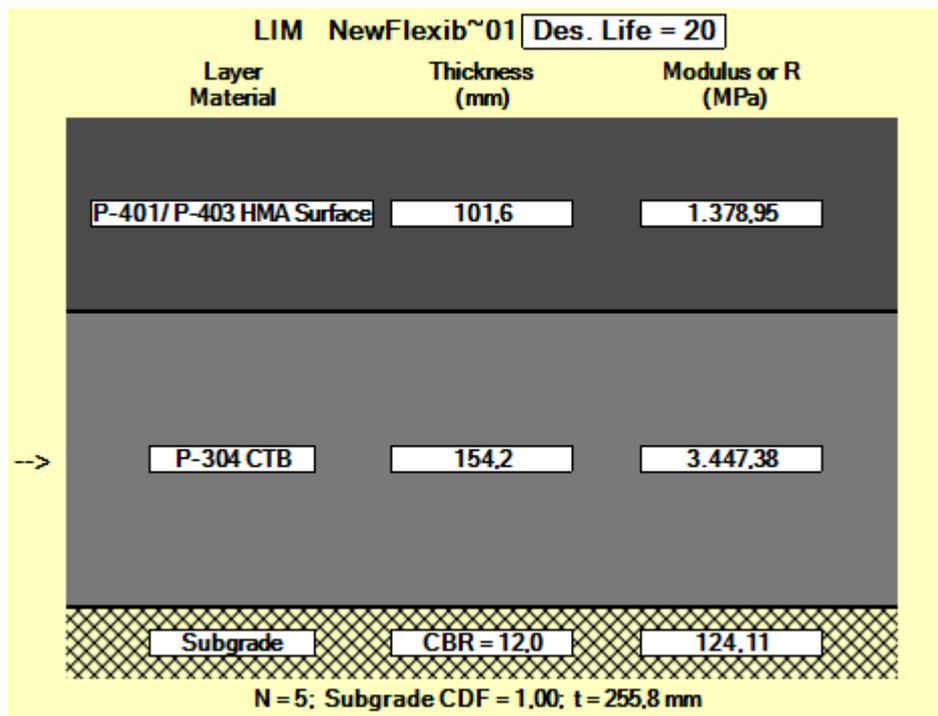


Figura B-5. Extracto de FAARFIELD con solución de pavimento de margen. Fuente: Elaboración propia.

Se ha partido de una capa asfáltica de 15 cm similar a la dispuesta en el pavimento resistente para facilitar la ejecución continua de estas capas.





# C. PCN DE LOS PAVIMENTOS AERONÁUTICOS DISEÑADOS

---

Se realiza el cálculo del PCN haciendo uso del programa COMFAA y la Advisory Circular 150/5335-5C – *Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength – PCN*.

## C.1. Método estandarizado ACN-PCN

El método *Número de clasificación de aeronaves – Número de clasificación de pavimentos (ACN-PCN)*, hace posible expresar el efecto individual de una aeronave sobre diferentes pavimentos a través de un único número, que varía de acuerdo al peso y la configuración de la aeronave (tipo de tren de aterrizaje, presión de neumáticos, entre otros), el tipo de pavimento y la resistencia de la subbase; ese número es llamado *Número de Clasificación de Aeronave (ACN)*.

Por otro lado, la capacidad de carga de un pavimento también puede ser expresado por un único número, sin necesidad de indicar una aeronave particular o información detallada de la estructura del pavimento; este número es el *Número de Clasificación del Pavimento (PCN)*.

## C.2. Metodología FAA

Para la determinación del ACN-PCN de cada una de las posiciones y sectores mencionados, se ha empleado el programa COMFAA 3.0, desarrollado por la Federal Aviation Administration (FAA) para este propósito específico, incluyendo la circular AC 150/5335-5C la metodología específica de cálculo.

Para el cálculo del PCN se debe especificar lo siguiente:

- Grupo, tipo y características de la aeronave.
- Resistencia de la subrasante: en pavimentos flexibles se usa el ensayo CBR y en pavimentos rígidos el módulo de reacción (K) debajo de la losa.
- Para el caso de pavimentos flexibles, se hace necesario definir el *espesor equivalente* de acuerdo a la recomendación del apéndice B de la circular AC 150/5335-5C de la FAA, así como la resistencia a la flexión.
- En pavimentos rígidos, espesor de losa de concreto hidráulico.

Tabla C-1. Tipos de transmisión y frecuencia central. *Fuente: FAA.*

Ejemplo	80	R	B	W	T
Significado	PCN	Tipo de pavimento	Categoría Subrasante	Presión de Inflado Admisible	Método de Determinación del PCN

### C.2.1. Tipo de pavimento

Según la metodología, se utiliza el código (R) para el pavimento rígido y (F) para flexible.

Tabla C-2. Tipo de pavimento y código asignado. *Fuente: FAA.*

Tipo de Pavimento	Código de Pavimento
Flexible	F
Rígido	R

### C.2.2. Categoría de la subrasante

El método utiliza cuatro niveles estándar de resistencia de la subrasante para pavimentos rígidos y flexibles. Estas condiciones de resistencia estándar se utilizan para representar un rango de condiciones de la subrasante como se muestra en la tabla siguiente.

Tabla C-3. Categoría de la subrasante. *Fuente: FAA.*

Categoría resistencia de la subrasante	K pci (MN/m <sup>3</sup> )	CBR (%)	Código Designación
Alto	$K \geq 442$ ( $\geq 120$ )	$CBR \geq 13$	A
Medio	$221 < k < 442$ ( $60 < k < 120$ )	$8 < CBR < 13$	B
Bajo	$92 < k \leq 221$ ( $25 < k \leq 60$ )	$4 < CBR \leq 8$	C
Muy Bajo	$k \leq 92$ ( $\leq 25$ )	$CBR \leq 4$	D

### C.2.3. Presión de inflado

Cuatro categorías son usadas para el reporte y se define en la siguiente tabla:

Tabla C-4. Categorías de presión de inflado de los neumáticos. *Fuente: FAA.*

Categoría	Código	Rango de presión de neumáticos
Alto	W	No hay límite de presión
Medio	X	Presión limitada a 218 psi (1.5 Mpa)
Bajo	Y	Presión limitada a 145 psi (1.00 MPa)
Muy Bajo	Z	Presión limitada a 73 psi (0.50 MPa)

### C.2.4. Tipo de evaluación

La obtención del valor numérico del PCN para un pavimento dado puede basarse en dos procedimientos. Estos son conocidos como la utilización del “método de la aeronave” y el “método de evaluación técnica”.

Puede utilizarse cualquier procedimiento para obtener el valor PCN, pero el método que se utilice deberá ser reportado como parte integral de su informe de clasificación.

- (T) Evaluación técnica implica que debe haberse utilizado algún estudio técnico y cálculos en la determinación del PCN.
- (U) Si se utilizó el Método de la Aeronave significa que el PCN fue obtenido seleccionando el ACN máximo entre las aeronaves que operan en el aeródromo y que no causan daños en el pavimento.

### C.2.5. Ejemplo de reporte de PCN

Un ejemplo de un código PCN es 80/R/B/W/T donde 80 representa el valor numérico del PCN, R representa Pavimento Rígido, B representa subrasante de resistencia media, W representa presión admisible de inflado de llantas alta y T representa que el valor PCN se obtuvo mediante una evaluación técnica.

## C.3. Resultados ACN-PCN

A continuación se muestran los registros de las modelaciones mediante el programa COMFAA. La mezcla de tráfico, con su respectiva agrupación por grupo de aeronaves representativas para el programa COMFAA, es la misma que se ha utilizado en el programa FAARFIELD, mostrado con anterioridad.

Para determinar el espesor equivalente se emplea la hoja Excel soporte del programa COMFAA. Cada uno de los reportes que emite dicho programa se compone de cuatro bloques de información, tal como se indica a continuación.

- Encabezado. Resume los siguientes datos de entrada:
  - Nombre del archivo de reporte.
  - Nombre/ruta del archivo de flota de aeronaves de entrada.
  - Referencia a la metodología de cálculo de espesores de diseño estándar, de acuerdo con la Circular FAA 150/5320-6F.
  - Valor de módulo de reacción del apoyo de las losas y categoría resultante (A,B,C,D).
  - Resistencia a la flexión de las losas de hormigón.
  - Espesor de las losas.
  - Relación de Pasadas/Ciclos de Carga (P/TC).
  - Número máximo de ruedas por eje.
  - Cantidad de ejes por tren principal.
- Tabla 1: Datos de entrada del tránsito. Muestra el espesor requerido de diseño de acuerdo con la metodología de la FAA. Incluye la siguiente información.
  - Descripción de la aeronave.
  - Masa bruta total (tn).
  - Porcentaje de la masa total en el tren principal (%).
  - Presión del Inflado (kPa).

- Repeticiones anuales.
- Coberturas totales en 20 años.
- Espesor de losa calculado a partir del método de la Circular FAA 150/5320-6F de la FAA. En el caso que los espesores máximos de esta columna superen el espesor real de la losa, se tendrá una condición de insuficiencia estructural, la cual debe confirmarse con los valores del Factor de Daño Acumulado (CDF).
- Tabla 2: Valores de PCN. Muestra los resultados detallados basados en el procedimiento de determinación del Factor de Daño Acumulado (CDF) que permite el cálculo del efecto de la combinación de aeronaves a lo largo del período de análisis. El análisis del CDF calcula también el máximo peso admisible, el nivel de repeticiones admisibles y el espesor requerido para el tránsito total. Se compone de los siguientes datos (se obvian las columnas de identificación de las aeronaves).
  - Coberturas admisibles en el período de análisis.
  - Espesor requerido para las repeticiones admisibles.
  - Peso bruto máximo admisible.
  - PCN para cada categoría de soporte de las losas (módulos de reacción en MPa/m). De acuerdo con la categoría del soporte de las losas, el máximo valor de esta columna corresponde al PCN de la sección de pavimento analizada.
  - Factor de Daño Acumulado.
- Tabla 3: ACN para los pesos brutos y resistencia indicados. Muestra los valores de ACN de cada aeronave para cada nivel de capacidad de soporte (A-D).

### C.3.1. Pavimento rígido

Los datos a introducir en el Programa de la FAA COMFAA 3.0 para determinar el PCN, serán un espesor equivalente de 450 mm y un valor de K de 135.7 MN/m<sup>3</sup>, equivalente al paquete de firmes considerado en el diseño del nuevo pavimento rígido: 45 cm P-501 (losa), 30 cm P-306 (magro), 50 cm P-209 (zahorra), con un valor de k de subrasante de 53.9 135.7 MN/m<sup>3</sup>.

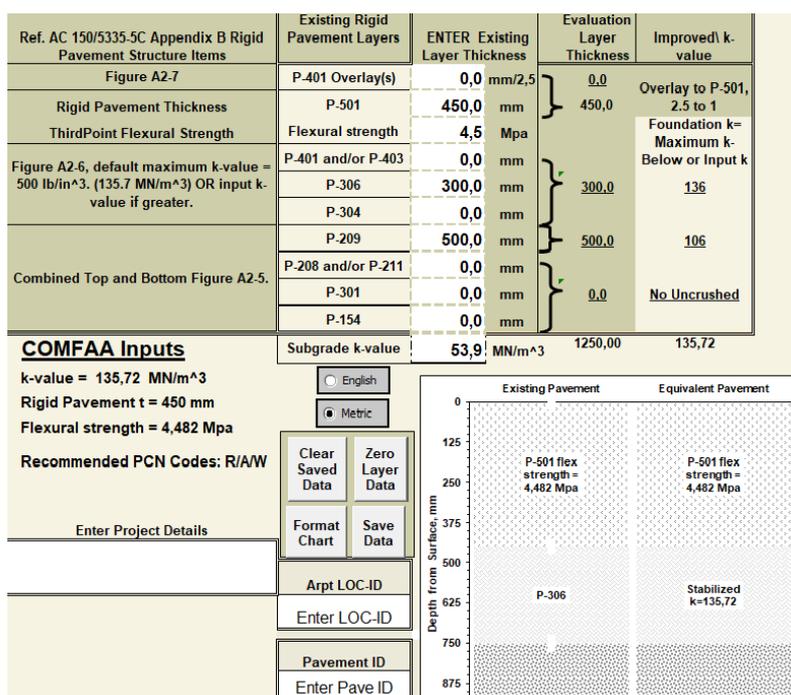


Figura C-1. Extracto de Excel de COMFAA con datos de pavimento rígido. Fuente: Elaboración propia.

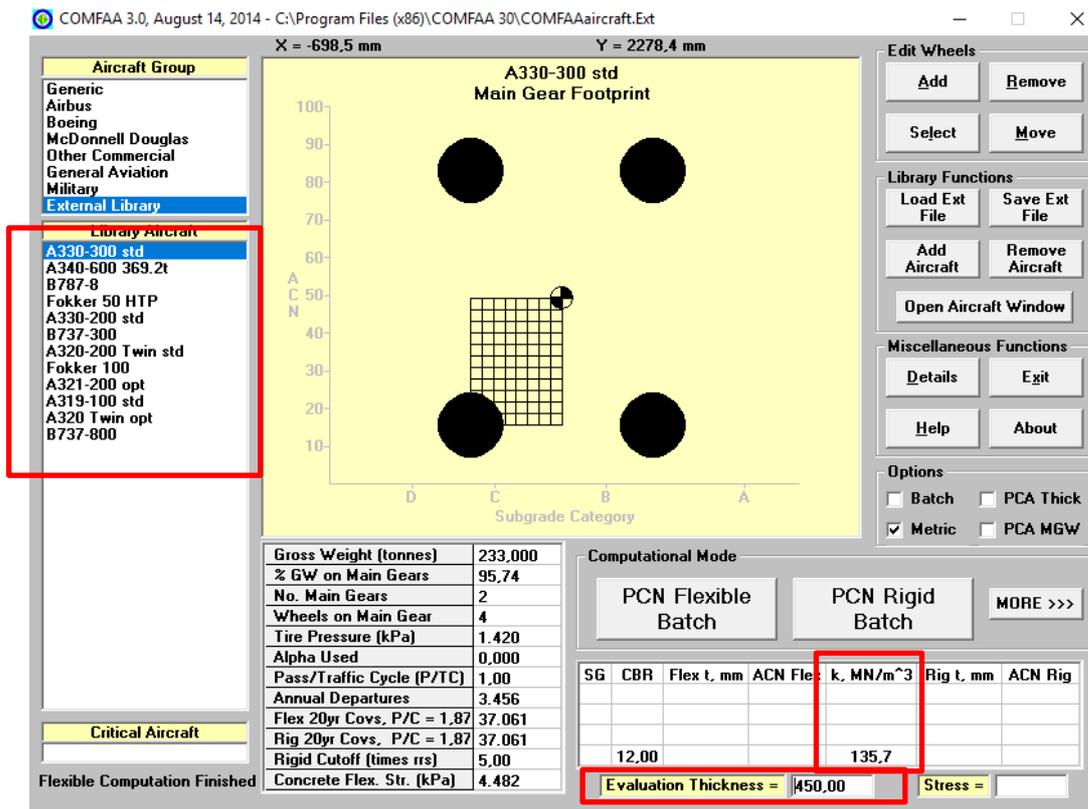


Figura C-2. Extracto de COMFAA, señalando la flota, las características de la subrasante y el espesor de evaluación extraído del Excel. Fuente: Elaboración propia.

Results Table 1. Input Traffic Data

No.	Aircraft Name	Gross Weight	Percent Gross Wt	Tire Press	Annual Deps	20-yr Coverages	6D Thick
1	A330-300 std	233,000	95,74	1.420	3.456	37.061	353,1
2	A340-600 369.2t	380,000	64,45	1.610	3.675	38.781	382,6
3	B787-8	250,836	91,30	1.572	3.987	21.777	370,8
4	Fokker 50 HTP	23,000	95,60	590	5.914	30.969	175,7
5	A330-200 std	233,000	94,80	1.420	7.407	79.040	367,4
6	B737-300	52,290	90,86	1.386	9.112	42.757	297,0
7	A320-200 Twin std	78,000	93,80	1.380	12.131	66.976	369,9
8	Fokker 100	41,640	95,60	980	14.623	78.630	276,5
9	A321-200 opt	93,500	94,60	1.500	14.771	85.960	419,4
10	A319-100 std	75,500	92,60	1.190	18.091	105.088	359,7
11	A320 Twin opt	78,000	92,80	1.440	26.643	143.265	387,0
12	B737-800	79,000	93,56	1.413	36.189	203.146	401,3

Figura C-3. Extracto de resultados tras evaluación en COMFAA para pavimento rígido. Tabla 1: Datos de tráfico. Indicación de espesor adecuado. Fuente: Elaboración propia.

En este extracto puede verse como el espesor adecuado en todos los casos se encuentra por debajo del valor de espesor introducido, 450 mm.

Results Table 2. PCN Values

No.	Aircraft Name	Critical Aircraft Total Equiv. Covs.	Thickness for Total Equiv. Covs.	Maximum Allowable Gross Weight	ACN Thick at Max. Allowable Gross Weight	CDF	PCN on A(150)
1	A330-300 std	2.152.854	438,6	246,456	323,24	0,0100	58,3
2	A340-600 369.2t	435.581	437,7	402,569	349,89	0,0519	69,4
3	B787-8	405.926	437,7	263,059	359,73	0,0313	73,7
4	Fokker 50 HTP	>5,000,000	444,3	23,595	154,10	0,0000	11,7
5	A330-200 std	2.369.486	438,7	246,406	321,43	0,0195	57,6
6	B737-300	>5,000,000	440,5	54,547	244,76	0,0002	31,8
7	A320-200 Twin std	1.669.779	438,5	81,969	299,12	0,0234	49,3
8	Fokker 100	>5,000,000	441,5	43,202	225,23	0,0000	26,6
9	A321-200 opt	181.275	437,1	98,809	336,93	0,2765	63,9
10	A319-100 std	>5,000,000	439,1	79,118	285,10	0,0114	44,4
11	A320 Twin opt	1.597.227	438,5	81,966	299,13	0,0523	49,3
12	B737-800	1.111.037	438,3	83,069	306,81	0,1066	52,1
Total CDF =						0,5831	

Figura C-4. Extracto de resultados tras evaluación en COMFAA de pavimento rígido. Tabla 2: Valores de PCN. Indicación de PCN superior alcanzado. Fuente: *Elaboración propia*.

Tal y como puede observarse en la tabla anterior, se desprende un valor de PCN del pavimento proyectado de 73.7. También, prestando atención al valor de CDF total, se constata que el valor es inferior a la unidad. Esto se traduce directamente en la idoneidad del paquete, es decir, soportará sin ningún tipo de limitación la mezcla de tráfico considerada. Se analiza a continuación la tabla del ACN.

Results Table 3. Rigid ACN at Indicated Gross Weight and Strength

No.	Aircraft Name	Gross Weight	% GW on Main Gear	Tire Pressure	ACN Thick	ACN on A(150)
1	A330-300 std	233,000	95,74	1.420	313,3	54,5
2	A340-600 369.2t	380,000	64,45	1.610	338,5	64,5
3	B787-8	250,836	91,30	1.572	349,0	69,0
4	Fokker 50 HTP	23,000	95,60	590	151,9	11,3
5	A330-200 std	233,000	94,80	1.420	311,6	53,8
6	B737-300	52,290	90,86	1.386	239,2	30,3
7	A320-200 Twin std	78,000	93,80	1.380	291,1	46,4
8	Fokker 100	41,640	95,60	980	220,6	25,4
9	A321-200 opt	93,500	94,60	1.500	326,8	59,8
10	A319-100 std	75,500	92,60	1.190	277,8	41,9
11	A320 Twin opt	78,000	92,80	1.440	291,1	46,4
12	B737-800	79,000	93,56	1.413	298,4	49,0

Figura C-5. Extracto de resultados tras evaluación en COMFAA de pavimento rígido. Tabla 3: Valores de ACN. Indicación de ACN superior alcanzado. Fuente: *Elaboración propia*.

De las tablas anteriores se extrae que la aeronave B787-8 es la que cuenta con un mayor ACN. Si se compara con el PCN de la tabla anterior para este mismo modelo, se comprueba que el PCN es mayor que el ACN. No sólo ocurre en este modelo, también para el resto de las aeronaves. Con todo esto, puede expresarse el PCN del pavimento de la siguiente manera:

**PCN 73/R/A/W/T**

### C.3.2. Pavimento flexible

Los datos a introducir en el programa de la FAA COMFAA 3.0 para determinar el PCN, será un espesor equivalente de 795 mm y habiendo caracterizado el terreno de fundación con un CBR 12.

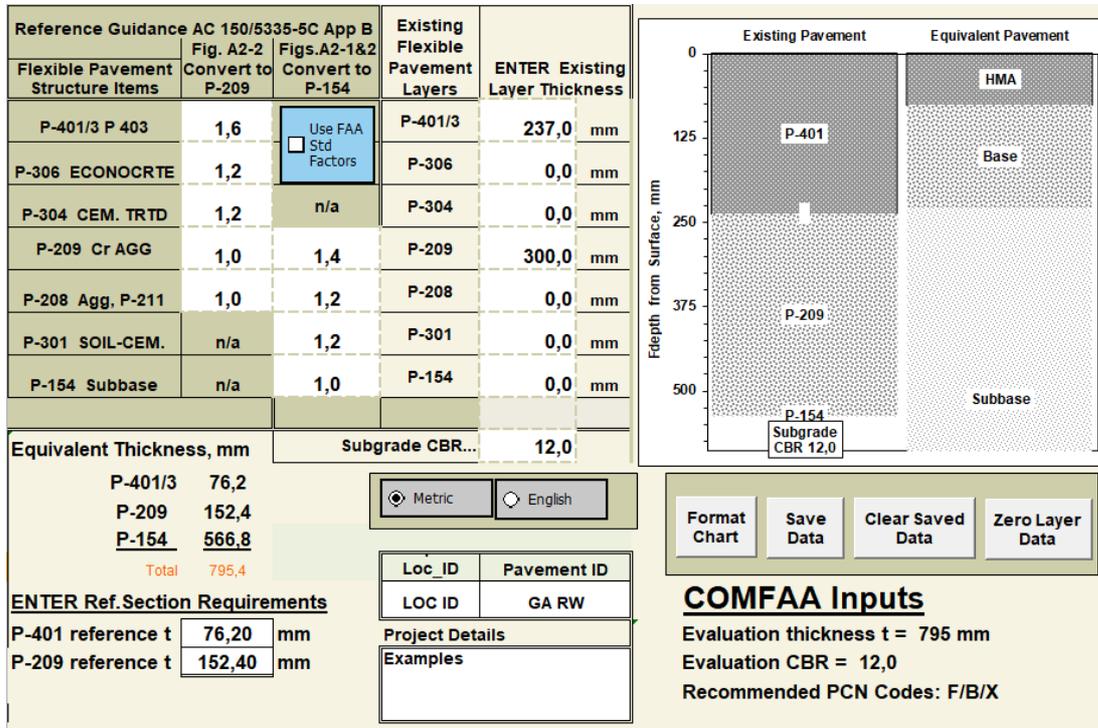


Figura C-6. Extracto de Excel de COMFAA con datos de pavimento flexible. Fuente: Elaboración propia.

Results Table 1. Input Traffic Data

No.	Aircraft Name	Gross Weight	Percent Gross Wt	Tire Press	Annual Deps	20-yr Coverages	6D Thick
1	A330-300 std	233,000	95,74	1.420	3.456	37.061	644,0
2	A340-600 369.2t	380,000	64,45	1.610	3.675	38.781	692,8
3	B787-8	250,836	91,30	1.572	3.987	43.554	709,1
4	Fokker 50 HTP	23,000	95,60	590	5.914	30.969	270,6
5	A330-200 std	233,000	94,80	1.420	7.407	79.040	658,9
6	B737-300	52,290	90,86	1.386	9.112	42.757	437,8
7	A320-200 Twin std	78,000	93,80	1.380	12.131	66.976	560,2
8	Fokker 100	41,640	95,60	980	14.623	78.630	422,8
9	A321-200 opt	93,500	94,60	1.500	14.771	85.960	641,0
10	A319-100 std	75,500	92,60	1.190	18.091	105.088	551,9
11	A320 Twin opt	78,000	92,80	1.440	26.643	143.265	578,2
12	B737-800	79,000	93,56	1.413	36.189	203.146	603,4

Figura C-7. Extracto de resultados tras evaluación en COMFAA para pavimento flexible. Tabla 1: Datos de tráfico. Indicación de espesor adecuado. Fuente: Elaboración propia.

Results Table 2. PCN Values

No.	Aircraft Name	Critical Aircraft Total Equiv. Covs.	Thickness for Total Equiv. Covs.	Maximum Allowable Gross Weight	ACN Thick at Max. Allowable Gross Weight	CDF	PCN on B(10)
1	A330-300 std	>5,000,000	776,6	241,163	706,85	0,0000	66,3
2	A340-600 369.2t	218.380	736,3	425,931	796,02	0,0059	84,2
3	B787-8	56.338	716,5	289,890	835,77	0,0255	92,8
4	Fokker 50 HTP	>5,000,000	425,1	64,672	566,29	0,0000	42,6
5	A330-200 std	>5,000,000	780,5	239,163	698,45	0,0000	64,8
6	B737-300	>5,000,000	667,4	68,549	537,60	0,0000	38,4
7	A320-200 Twin std	>5,000,000	775,4	80,853	580,59	0,0000	44,8
8	Fokker 100	>5,000,000	627,3	62,302	552,60	0,0000	40,6
9	A321-200 opt	1.752.925	723,8	107,607	702,33	0,0016	65,5
10	A319-100 std	>5,000,000	790,3	76,166	549,70	0,0000	40,1
11	A320 Twin opt	>5,000,000	778,0	80,799	578,69	0,0000	44,5
12	B737-800	>5,000,000	766,3	83,780	605,13	0,0000	48,6
Total CDF =						0,0330	

Figura C-8. Extracto de resultados tras evaluación en COMFAA de pavimento flexible. Tabla 2: Valores de PCN. Indicación de PCN superior alcanzado. Fuente: Elaboración propia.

Results Table 3. Flexible ACN at Indicated Gross Weight and Strength

No.	Aircraft Name	Gross Weight	% GW on Main Gear	Tire Pressure	ACN Thick	ACN on B(10)
1	A330-300 std	233,000	95,74	1.420	691,0	63,4
2	A340-600 369.2t	380,000	64,45	1.610	737,5	72,2
3	B787-8	250,836	91,30	1.572	753,5	75,5
4	Fokker 50 HTP	23,000	95,60	590	292,7	11,4
5	A330-200 std	233,000	94,80	1.420	686,6	62,6
6	B737-300	52,290	90,86	1.386	453,6	27,3
7	A320-200 Twin std	78,000	93,80	1.380	567,7	42,8
8	Fokker 100	41,640	95,60	980	426,1	24,1
9	A321-200 opt	93,500	94,60	1.500	642,5	54,8
10	A319-100 std	75,500	92,60	1.190	546,7	39,7
11	A320 Twin opt	78,000	92,80	1.440	566,5	42,6
12	B737-800	79,000	93,56	1.413	582,9	45,1

Figura C-9. Extracto de resultados tras evaluación en COMFAA de pavimento flexible. Tabla 3: Valores de ACN. Indicación de ACN superior alcanzado. Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el pavimento rígido, para el flexible se tiene que la aeronave con mayor ACN es el B787-8, siendo esta además la aeronave de diseño, pues cuenta con el mayor CDF con sobrada diferencia con respecto a los demás. Aquí nuevamente se aprecia que el PCN es mayor que el ACN en todo el espectro de la mezcla de tráfico, destacando que el valor que se obtiene es:

**PCN 92//A/X/T**





# REFERENCIAS

---

[1] OACI, «Manual de Diseño de Aeródromos,» Parte 3, *Doc. 9157*.

[2] FAA, « Advisory Circular /150/5320 ».

# Trabajo Fin de Máster

## Máster en Ingeniería Aeronáutica

### Mediciones y Presupuesto

Autor: Manuel Jesús Ibáñez Tirado

Tutor: Jorge Juan Fernández de la Cruz

**Dpto. Construcción y Proyectos de Ingeniería**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019



**ESTIMACIÓN PRESUPUESTO**

**Diseño básico funcional y constructivo de una plataforma de estacionamiento de aeronaves. Aeropuerto internacional Jorge Chávez de Lima (Perú)**

CLAVE	E.P.	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (\$)	IMPORTE (\$)
	<b>a</b>	<b>PRELIMINARES</b>				<b>300.000,00</b>
1	E.P. 01	Proteccion con barreras	ml	100,00	3.000,00	300.000,00
		Proteccion a base de BARRERA TIPO JERSEY , según norma de seguridad de Aeropuertos, incl. Anclaje sistema de rigidización, balizamiento nocturno, ene movimientos y todo lo necesario para su correcta ejecucción.				
	<b>b</b>	<b>MOVIMIENTO DE TIERRAS</b>				<b>1.741.290,94</b>
2	E.P.B. 01	Excavación y desmonte de tierra explanación	m3	94,00	112,51	10.575,94
		Demsmonte en tierra de la explanación con medios mecánicos, incluso agotamiento, entibado, perfilado de taludes, incluso carga y transporte de los productos de la excavación a lugar de empleo o lugar de acopio hasta 10 km de distancia, para posterior clasificación o transporte a vertedero (sin incluir transporte de tierras a vertedero autorizado), totalmente terminado. Incluida p.p. de elementos auxiliares y de incremento de precios por trabajos nocturnos. Unidad totalmente terminada				
3	E.P. B. 02	Escarificado/compactación/refino fondo caja	m2	16,00	48806	780.896,00
		Excavación de la explanación bajo firme existente o terreno natural, en todo tipo de terrenos (sin incluir carga y transporte de material a lugar de empleo, zona de acopio para posterior uso, o vertedero autorizado).				
4	E.P. B. 03	Terraplén c/suelo seleccionado cantera o préstamo	m3	13,00	73.063,00	949.819,00
		Terraplén en coronación con suelo seleccionado procedente de préstamos o canteras CBR>10, incluyendo extendido, humectación y compactación al 100% del proctor modificado, incluso perfilado de taludes, preparación de la superficie de asiento y rasanteo de precisión de la superficie de coronación con nivelación final de alta precisión con sensores aplicados a la hoja niveladora. Totalmente terminado. Incluso ejecución en horario nocturno.				
	<b>c</b>	<b>PAVIMENTOS</b>				<b>25.239.950,09</b>
5	E.P. C. 01	Sub-base granular de zahorra artificial	m3	14.919,00	423,56	6.319.091,64
		Zahorra artificial, husos ZA 0/32 en capas base, con 75% de caras de fractura, colocada en capa de subbase granular bajo firme asfáltico, incluido canos, carga y transporte desde el lugar de procedencia o cantera, a pie de obra, puesta en obra, extendida y compactada, incluso preparación de la superficie de asiento, en capas de 20/30 cm de espesor, medido sobre perfil. Desgaste de los ángeles de los áridos <30. Compactado al 100% del proctor modificado, incluso refino de última capa.				
6	E.P. C. 02	Geotextil de polipropileno de 200 gr/m2	m2	18.578,00	85,29	1.584.517,62
		Geotextil no tejido, compuestp por filamentos de polipropileno unidos por agujeteado y posterior calandrado, con un gramaje de 160 gr/m2, colocado en la explanación del fondo de caja.				
7	E.P. C. 03	Hormigón HP-45 en losas de espesor variable	m3	9.334,37	186,53	1.741.140,04
		Pavimento de hormigón para conformación de losas de plataforma de estacionamiento de aeronaves, de 45 kg/cm2 de resistencia de características a flexotracción, con árido menor de 40 mm, de 0,35 m de espesor y variable en caso de encuentro con losas adyacentes, debiendo ser el espesor de la losa existente con la que se realiza el encuentro, fabricado en central, incluso encofrado, desencofrado, curado y terminación superficial. Incluso transporte de hormigón.				
8	E.P. C. 04	Hormigón magro en base	m3	469,54	13,00	6.104,02
		Hormigón magro en base de firme rígido, de consistencia seca, conformado por hormigón de 200 kg de cemento por m3, y tamaño máximo de árido 40 mm, incluyendo aditivo aireante; fabricado en central.				
9	E.P. C. 05	Lámina de polietileno perforado	m3	9.276,18	233,92	2.169.884,03
		Colocación de lámina plástica perforada de polietileno de 250 micrómetros de espesor mínimo entre base y losa de hormigón, con extendido y fijación de la lámina evitando su deterioro por el paso de camiones hormigonera				

10	E.P. C. 06	<b>Geomalla de refuerzo EGRID 2020</b> Geomalla dispuesta en juntas y grietas en hormigón para evitar su reflexión sobre recocado posterior, compuesta por mallas de filamentos de poliéster de alto módulo elástico, con bajas propiedades de fluencia y relajación (DIN 18200), y geotextil no tejido ultraligero de polipropileno, con un gramaje del conjunto de 270 gr/m2. La colocación de la geomalla de refuerzo se realizará de modo que al extendido de la capa de aglomerado de recubrimiento presente una superficie plana y sin arrugas.	m2	18.578,00	75,00	1.393.350,00
11	E.P. C. 07	<b>Riego de Imprimación</b> Riego de imprimación, con emulsión asfáltica catiónica de imprimación tipo C50BF5 IMP (ECI), de capas granulares, con una dotación de 1kg/m2, incluso barrido y preparación de la superficie.	L	27.867,00	18,00	501.606,00
12	E.P. C. 08	<b>Riego de adherencia</b> Riego de adherencia, con emulsión asfáltica catiónica de rotura rápida tipo C60B3/B4 ADH (ECR-1) con una dotación de 1 kg/m2, incluso barrido y preparación de la superficie.	L	44.857,00	16,00	717.712,00
13	E.P. C. 09	<b>Corte en frío para transición</b> Corte en frío para transición	m3	4,98	463,99	2.310,67
14	E.P. C. 10	<b>M.B.C. tipo AC-32 base 50/70 (T-1) i/filler y Betún</b> Mezcla bituminosa en caliente tipo AC-32 BASE 50/70 en capa de base (antigua T-1), áridos con desgaste de los ángeles <30, fabricada y puesta en obra, extendido y compactación, incluso betún y filler de aportación. Densidad del aglomerado:2,40 t/m3	m3	2.368,95	1.700,00	4.027.215,00
15	E.P. C. 11	<b>M.B.C. tipo AC-22 base 50/70 (T-5) i/filler y Betún</b> Mezcla bituminosa en caliente tipo AC-22 BASE 50/70 en capa de base (antigua T-5), áridos con desgaste de los ángeles <30, fabricada y puesta en obra, extendido y compactación, incluso betún y filler de aportación. Densidad del aglomerado:2,40 t/m3	m3	1.235,63	1.800,00	2.224.134,00
16	E.P. C. 12	<b>M.B.C. tipo BBTM11A fibras (T-30) i/filler y Betún</b> Mezcla bituminosa en caliente tipo BBTM11A (antigua T-30), de granulometría discontinua, extendida en capa de rodadura, fabricada y puesta en obra, extendido y compactación.	m3	985,62	1.900,00	1.872.678,00
17	E.P. C. 13	<b>Junta dilatación con pasadores sellada silicona</b> Junta de dilatación, con panel de porexpan de 2cm, y sellado con fondo de junta a base de cordón de polietileno y masilla anticarburante en frío, tipo silicona autonivelante, para ser armada con pasadores y casquillos o no. Incluso imprimación y limpieza de la misma.	m	49,87	2.487,00	124.026,69
18	E.P. C. 14	<b>Junta construcción con pasadores sellada</b> Junta de construcción sellada con masilla anticarburante en frío, tipo de silicona autonivelante, con pasadores o no. Incluso imprimación y limpieza de la misma.	ml	68,80	2.514,50	172.997,60
19	E.P. C. 15	<b>Pasador de barra de acero</b> Pasador de barra de acero de 30 mm de diámetro y 51 cm de longitud, colocado en juntas. Totalmente terminado, incluido casquillo y engrasado, listo para hormigonado.	u	13,69	1.320,00	18.070,80
20	E.P. C. 16	<b>Junta de retracción C/S pasadores sellada</b> Junta de retracción sellada con fondo de junta con cordón de polietileno y con masilla anticarburante en frío, tipo silicona autonivelante, con pasadores o no. Incluso imprimación y limpieza de la misma.	m3	62,10	873,77	54.261,12
21	E.P. C. 17	<b>Terraplen con material de banco externo</b> Terraplen de material de banco externo que deba cumplir con lo establecido en la Normativa de material para extendido del Gobierno de Perú.	m3	423,62	186,53	79.017,84

22	E.P. C. 18	<b>Subrasante VRS 30%</b> Subrasante de material de banco que debiera cumplir con lo estipulado en la Normativa de material para ejecución de carreteras del Gobierno de Perú.	m3	536,21	233,92	125.430,24
23	E.P. C. 19	<b>Base Modificada al 4% con Cemento</b> Base Modificada al 4% con Cemento Portland, Compatada al 100% de su P.V.S.M., determiando por la prueba AASTHO modificada.	m3	453,23	873,77	396.018,78
24	E.P. C. 20	<b>Losa de Concreto</b> Losa de concreto hidraulico premezclado de 37 cm.de espesor, M.r.de 48 kg/cm2 a 28 dias, T.M.A. 38mm, incl. acarreo de los materiales y equipos necesarios, cimbra metálica, tendido del concreto, compactacion, nivelacion, acabado escobillado fino, curado, aserrado de juntas de contraccion, de expansion, de construccion, longitudinal, cortes, sellado. materiales, pasadores, equipo, mano de obra necesaria, y todo lo que se necesite para la construccion del pavimento indicado, segun proyecto y especificaciones particulares, y recomendaciones del diseño de pavimentos.	m3	657,84	2.600,00	1.710.384,00
	<b>e</b>	<b>MARGEN DE PLATAFORMA</b>				<b>2.830.942,42</b>
25	E.P. E. 01	<b>Geotextil de polipropileno de 200 gr/m2</b> Geotextil no tejido, compuestp por filamentos de polipropileno unidos por agujeteado y posterior calandrado, con un gramaje de 160 gr/m2, colocado en la explanación del fondo de caja.	m2	1.532,10	85,29	130.672,81
26	E.P. E. 02	<b>Capa de transición con calidad sub-rasante</b> Capa de transición con calidad sub-rasante.	m3	363,21	330,00	119.859,30
27	E.P. E. 03	<b>Terraplen con material de banco externo</b> Terraplen de material de banco externo que debiera cumplir con lo establecido en la Normativa de material para extendido del Gobierno de Perú.	m3	1.864,78	186,53	347.837,41
28	E.P. E. 04	<b>Subrasante</b> Subrasante de material de banco que debiera cumplir con lo estipulado en la Normativa de material para ejecución de carreteras del Gobierno de Perú.	m3	988,47	233,92	231.222,90
29	E.P. E. 05	<b>Riego de Impregnacion con Emulsion Asfaltica</b> Riego de impregnacion con emulsion asfaltica de rompimiento lento pura, a razon de 1.5 lt/m2, sobre base modificada. Incluye. preparacion de la superficie, barrido, materiales, equipo, y mano de obra necesaria.	L	4.350,00	18,00	78.300,00
30	E.P. E. 06	<b>M.B.C. tipo AC-22 base 50/70 (T-5) i/filler y Betún</b> Mezcla bituminosa en caliente tipo AC-22 BASE 50/70 en capa de base (antigua T-5), áridos con desgaste de los ángeles <30, fabricada y puesta en obra, extendido y compactación, incluso betún y filler de aportación. Densidad del aglomerado:2,40 t/m3	m3	841,10	1.800,00	1.513.980,00
31	E.P. E. 07	<b>M.B.C. tipo BBTM11A fibras (T-30) i/filler y Betún</b> Mezcla bituminosa en caliente tipo BBTM11A (antigua T-30), de granulometría discontinua, extendida en capa de rodadura, fabricada y puesta en obra, extendido y compactación.	m3	215,30	1.900,00	409.070,00
	<b>f</b>	<b>FRANJAS DE SEGURIDAD</b>				<b>304.204,50</b>
32	E.P. 09	<b>Conformación de franjas de seguridad</b> Conformación de franjas de seguridad con material producto de la excavación.	m3	6.760,10	45,00	304.204,50

	<b>g</b>	<b>SEÑALES HORIZONTALES</b>				<b>146.962,80</b>
33	E.P. G. 01	Pintura de Trafico Base Acuosa	m2	1.224,69	120,00	146.962,80
		Pintura de Trafico Base Acuosa del Color Inicado en Proyecto.				
	<b>h</b>	<b>ILUMINACIÓN DE PLATAFORMA</b>				<b>1.038.041,52</b>
34	E.P. H. 01	Torre de iluminación de 25 m	Pza	8,00	92.568,23	740.545,84
		Torre de iluminación de 25 m de altura útil con fuste de hormigón armado, centrifugado y pretensado, con sistema de fijación al basamento mediante pernos en jaula GEWI, con placa base y pernos de anclaje con tuercas y contratueras, equipada con corona móvil para instalación hasta 12 proyectores de 2000W, 400V y balizas de obstáculos, torno-reductor instalado en el interior del fuste, rail guía a lo largo de la generatriz del mismo, sistema electro-mecánico para desplazamiento de la plataforma, con sistema doble freno paracaídas, alimentación eléctrica mediante enclavamiento. Incluye cableado desde cuadro a pie de torre hasta proyectores, y preinstalación de los mismos orientados según planos. Totalmente instalada. No incluye alquiler de las grúas necesarias para la descarga y el izado ni el de la plataforma elevadora para montajes auxiliares.				
35	E.P. H. 02	Arqueta de tierra	Pza	8,00	499,88	3.999,04
		Arqueta para la colocación de la pica de tierra, de dimensiones de 40x40x50 cm. Construida en hormigón HM-20 y dotada de tapa de fundición de 40x40 cm.				
36	E.P. H. 03	Conductor RZ1 0,6/1KV 1x2,5 mm2	ml	8,69	17.842,20	155.048,72
		Conductor de cobre tipo RZ1 0,6/1KV de 1x2,5 mm2 de sección. Descripción: instalación del conductor en conducto, incluso P.P. de clemas y elementos de conexión y material de conexionado.				
37	E.P. H. 04	Puesta a tierra del conjunto armario-torre	m	8,00	165,07	1.320,56
		Puesta a tierra del conjunto armario-torre, consistente en clavado de cuatro picas de acero recubierto de cobre, de diámetro 18,3mm y longitud 200 cm. Tendido de cable de cobre desnudo de 95 mm2 de sección, conexionado de los elementos de puesta a tierra, completamente terminada.				
38	E.P. H. 05	Cimentación para torre de iluminación	Pza	8,00	1.423,14	11.385,12
		Cimentación para torre de iluminación de 30 mde altura útil, construida en hormigón HA-25 armada con acero B500 S. Incluyendo demolición de pavimento, excavación, hormigón de limpieza de 10 cm de espesor, encofrado y desencofrado, relleno y compactación con tierras procedentes de la excavación, solera de hormigón de 30 cm, de espesor, carga y transporte de material sobrante a vertedero.				
39	E.P. H. 06	Baliza de obstáculos	m	45,00	2.200,00	99.000,00
		Baliza de obstáculo sencilla de baja intensidad, tipo A según OACI, con fuente luminosa de LEDs de color rojo, de larga duración y bajo consumo y una vida media de unas 50000H marca ADB o equivalente. Incorpora filtro antirruído para instalaciones de telecomunicaciones si se requiere, a colocar en torrede iluminación.				
40	E.P. H. 07	Instalación de cuadro a pie de torre i/acometidas	m	8,00	692,68	5.541,44
		Unidad instalada de cuadro a pie de torre, según necesidades del aeropuerto, con ventilación forzada para garantizar estanqueidad incluido acometidas.				
41	E.P. H. 08	Adecuación de cuadros eléctricos a pie de torres existentes	Pza	8,00	2.650,10	21.200,80
		Adecuación de los cuadros eléctricos ubicados a pie de torres existentes adaptándolos a los nuevos poyectores de acuerdo a la normativa.				
		<b>TOTAL</b>				<b>31.601.392,27</b>

# Trabajo Fin de Máster

## Máster en Ingeniería Aeronáutica

### Planos

Autor: Manuel Jesús Ibáñez Tirado

Tutor: Jorge Juan Fernández de la Cruz

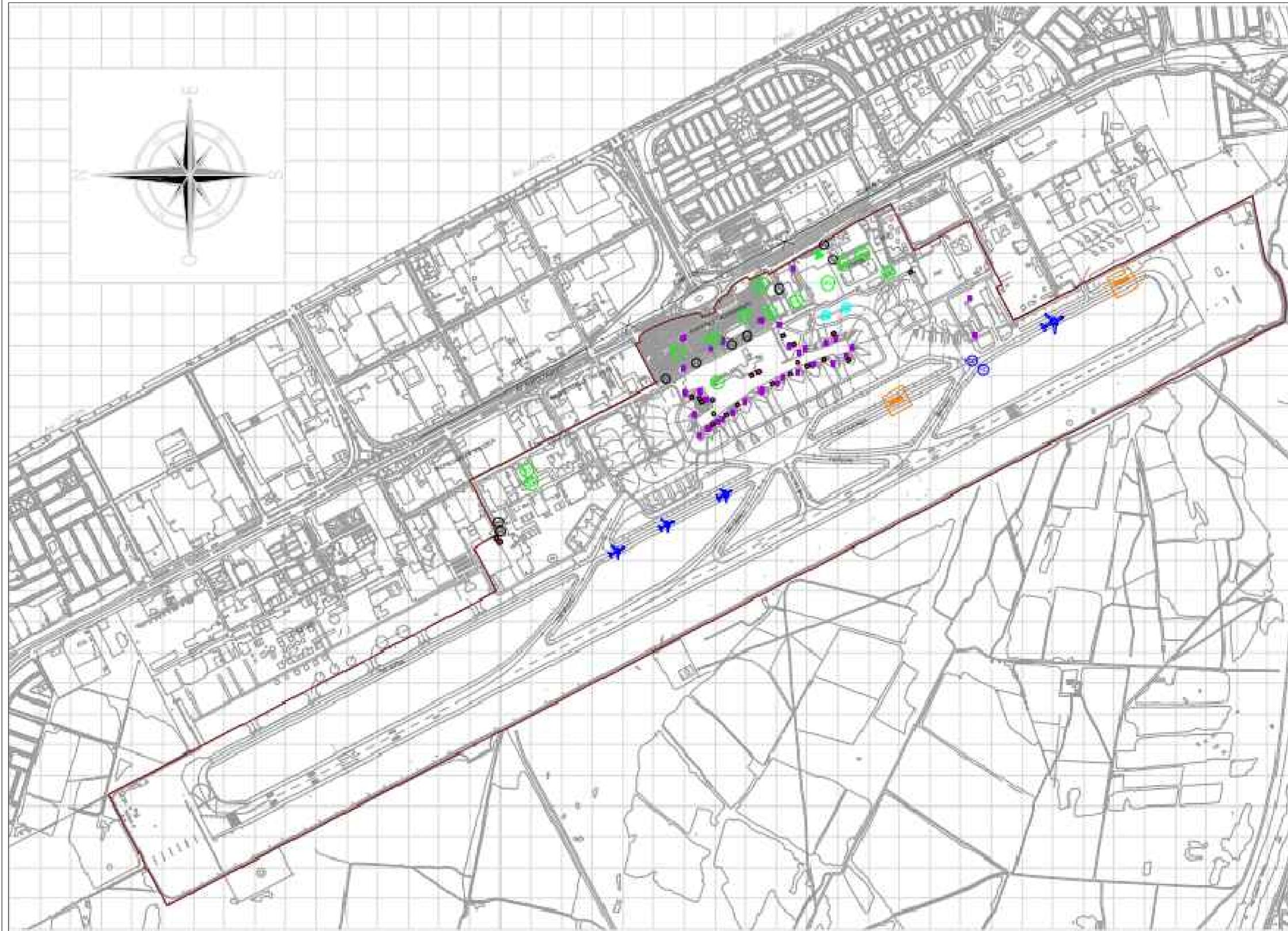
**Dpto. Construcción y Proyectos de Ingeniería**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019

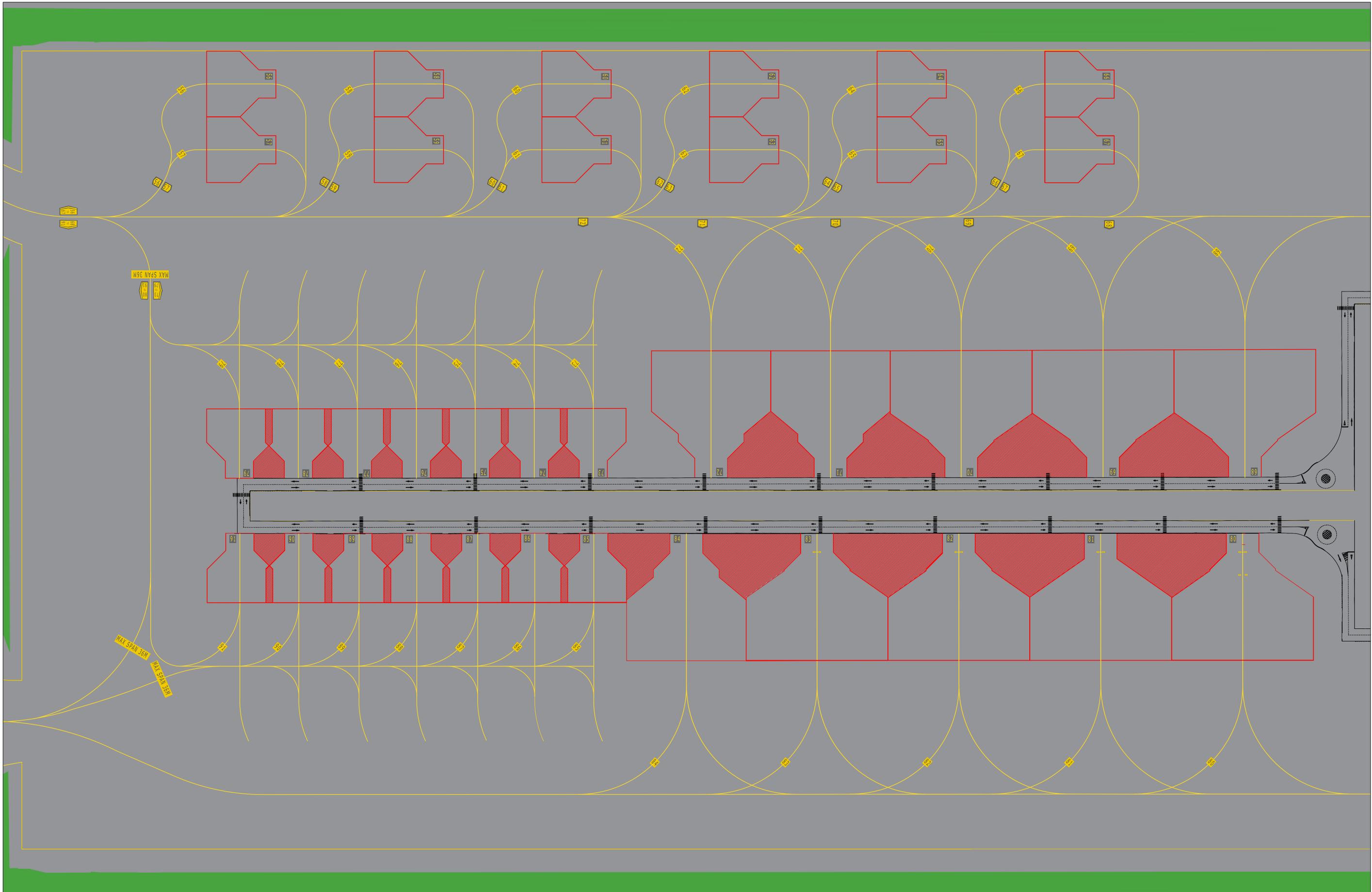




Dibujado por: <b>Manuel Jesús Ibáñez Tirado</b>		<b>DISEÑO BÁSICO FUNCIONAL Y CONSTRUCTIVO DE UNA PLATAFORMA DE ESTACIONAMIENTO DE AERONAVES. AEROPUERTO INTERNACIONAL JORGE CHÁVEZ</b>		
Titular de: <b>Máster en Ingeniería Aeronáutica</b>				
Trabajo Fin de Máster		1. SITUACIÓN		
Escuela Técnica Superior de Ingeniería				
HOJA Nº 1	PLANO Nº 1/5	FECHA JULIO 2019	Lima (Perú)	

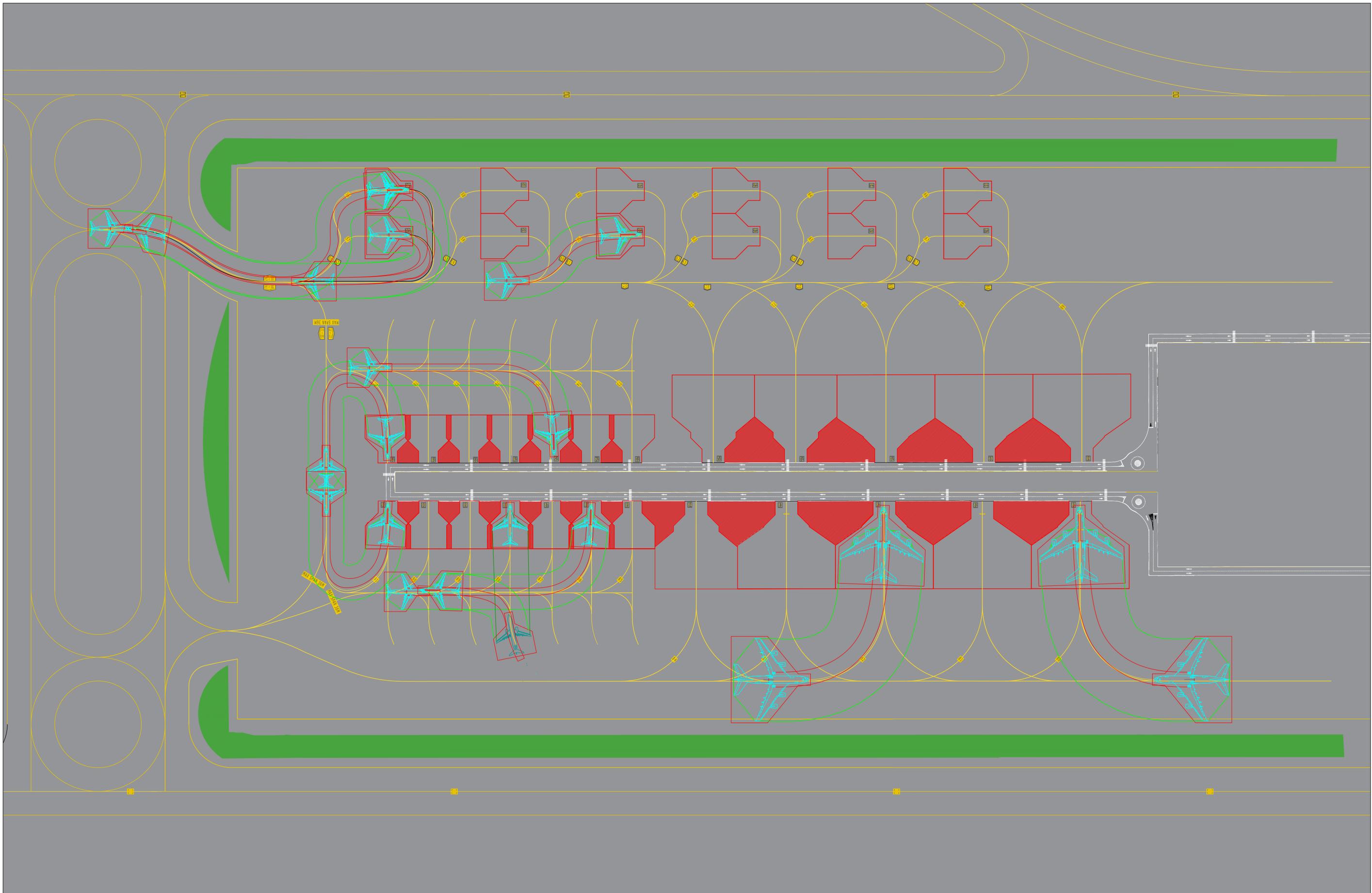


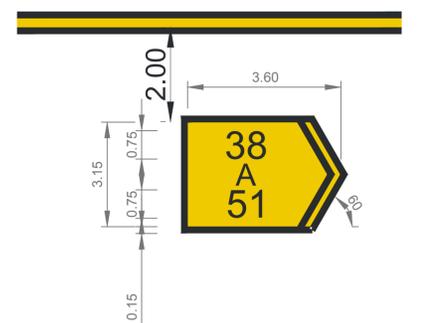
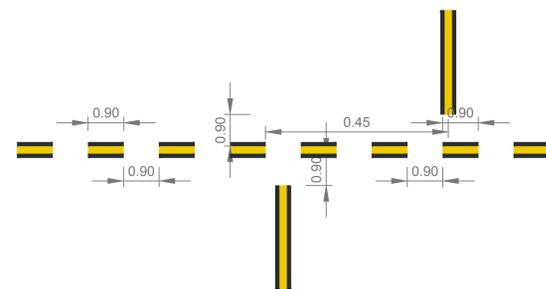
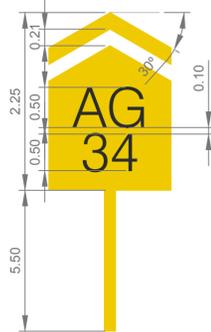
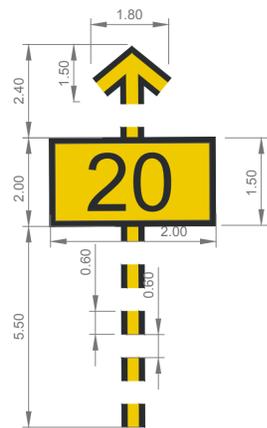
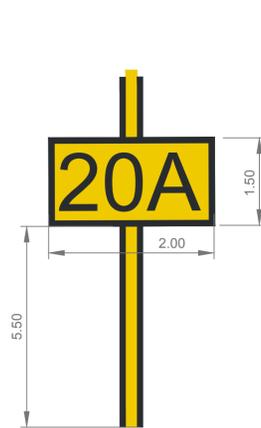
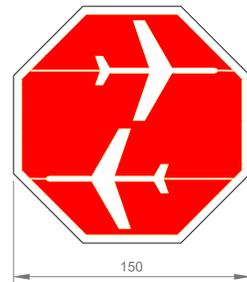
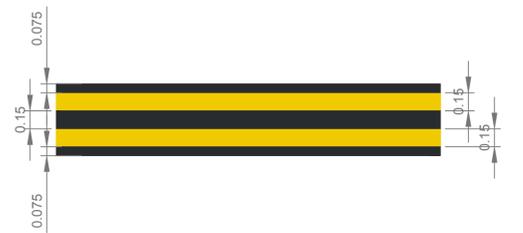
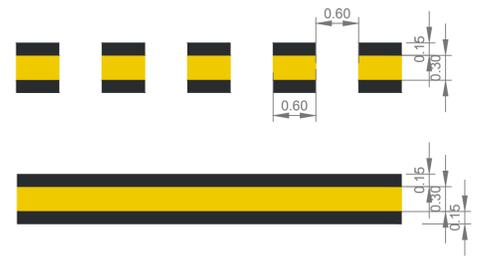
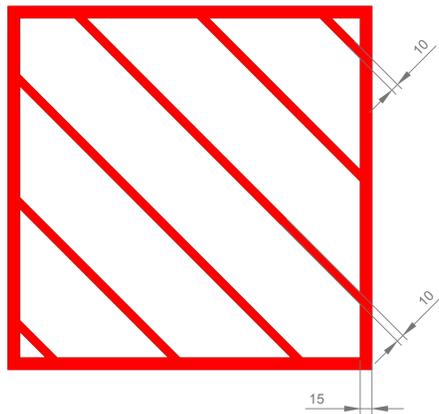
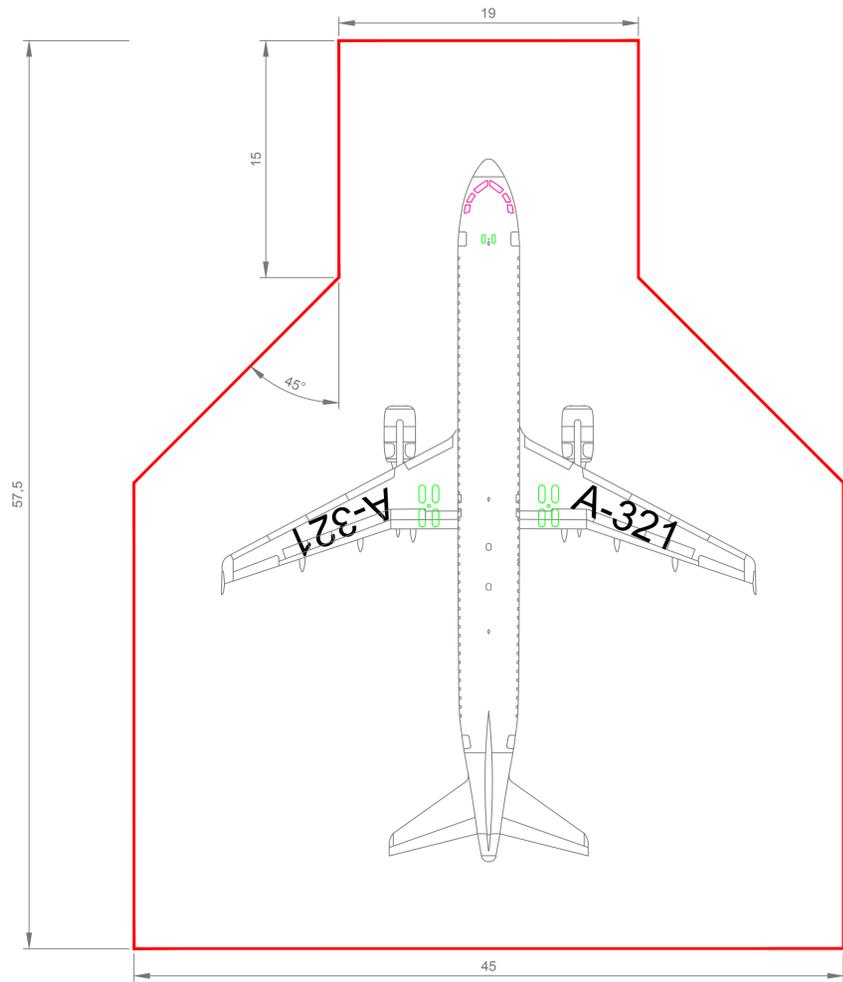
- I INTERFERENCIA ILICITA
- H HELIPUERTOS DE EMERGENCIA
- S ZONA DE SEGURIDAD
- 1 INGRESO VEHICULAR
- 2 INGRESO PEATONAL
- A, B, C, D, ... CALLES DE RODAJE
- TOMAS DE AGUA
- ▲ PUNTO DE CITA
- R RESCATE
- A AMBULANCIA
- SALA DE HERIDOS
- SALA DE ILESOS
- ATENCION DE FAMILIARES
- PUNTO DE REUNION
- TOMA DE GAS



Dibujado por: <b>Manuel Jesús Ibáñez Tirado</b>		<b>DISEÑO BÁSICO FUNCIONAL Y CONSTRUCTIVO DE UNA PLATAFORMA DE ESTACIONAMIENTO DE AERONAVES. AEROPUERTO INTERNACIONAL JORGE CHÁVEZ</b>				
Título: <b>Máster en Ingeniería Aeronáutica</b>						
Trabajo Fin de Máster		<b>3. ESTADO PROYECTADO</b>				
Escuela Técnica Superior de Ingeniería						
HOJA Nº	1	PLANO Nº	3/5	FECHA	30.10.2019	Lima (Perú)







Cotas expresadas en m.

Dibujado por: <b>Manuel Jesús Ibáñez Tirado</b>		<b>DISEÑO BÁSICO FUNCIONAL Y CONSTRUCTIVO DE UNA PLATAFORMA DE ESTACIONAMIENTO DE AERONAVES. AEROPUERTO INTERNACIONAL JORGE CHÁVEZ</b>	
Tutor: <b>Máster en Ingeniería Aeronáutica</b>			
Trabajo Fin de Máster		5. SEÑALIZACIÓN HORIZONTAL	
Escuela Técnica Superior de Ingeniería		Lima (Perú)	
HOJA Nº 1	PLANO Nº 5/5	FECHA: JULIO 2019	

