



Universidad Europea de Madrid
Escuela de Arquitectura, Ingeniería y Diseño

Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

Trabajo Fin de Máster

**Propuesta de Implementación de Torres de
Control Remotas en Aeropuertos de Baja
Densidad de Tráfico Aéreo**

Silvia Asuero von Munthe af Morgenstjerne

Curso 2023-2024

Título: Propuesta de Implementación de Torres de Control Remotas en Aeropuertos de Baja Densidad de Tráfico Aéreo

Autor: Silvia Asuero von Munthe af Morgenstierne

Tutor: Pablo López Delgado

Convocatoria: Junio 2024

RESUMEN

La provisión de servicios de control de tránsito aéreo con carácter remoto toma su origen en la necesidad de mejora de los procedimientos operacionales de la gestión del tráfico aéreo y la constante evolución de la tecnología. Ambos factores han dado paso al desarrollo de una alternativa, basada en la sustitución de la torre convencional actual por sistemas de cámaras y procesamientos de datos capaces de proporcionar una réplica del entorno aeroportuario y el espacio aéreo en las inmediaciones del mismo, permitiendo así gestionar el tráfico aéreo desde un emplazamiento remoto. Asimismo, es posible operar la torre de control remota en modo múltiple, lo que implica la provisión de servicios a varios aeropuertos simultáneamente desde un único centro de control. Este modo de operación presenta, a su vez, una reducción en los costes operativos de la torre de control, contribuyendo a la mejora del rendimiento económico del aeropuerto. En este estudio se realiza un análisis de la viabilidad, técnica y económica, de la provisión simultánea de servicios de control de tránsito aéreo a cuatro aeropuertos del norte de España, de menor densidad de tráfico aéreo, desde un único centro de control remoto.

ABSTRACT

The remote provision of air traffic control services comes into being due to the need of improvement of air traffic management procedures and the constant evolution of technology. These two factors have contributed to the introduction and development of an alternative, based on the replacement of the current conventional control tower with camera and data processing systems capable of providing a replica of the airport's environment and the airspace in its vicinity, thus allowing air traffic management from a remote location. Likewise, it's possible to operate the remote control tower in multiple mode, which implies the provision of air traffic services to several airports simultaneously. This mode of operation presents reductions in the operating costs of the control tower, enhancing the airport's economic performance. This project analyzes the technical and economic feasibility of the simultaneous provision of air traffic control services to four low-traffic airports, located in northern Spain, from a single remote control center.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por su infatigable apoyo y paciencia durante este cierre de etapa.

A Guillermo, por ser mi primer cómplice en el apasionante mundo de la aviación.

A mi tutor, Pablo López Delgado, por su conocimiento, guía y apoyo.

Y agradecer, además, a todas aquellas personas que me han acompañado en el camino.

Índice

1	Capítulo 1. Introducción	9
1.1	Definición del Problema	9
1.2	Objetivos del Proyecto	9
1.3	Estructura del Proyecto	9
2	Capítulo 2. Estado del Arte	10
2.1	Torres de Control Remotas	10
2.1.1	Modos de Operación	10
2.1.2	Tecnología Torre de Control Remota	11
2.1.3	Centro de Control Remoto	14
2.1.4	Consideraciones de Implementación	17
2.2	Situación Actual en España	18
2.2.1	Aeropuerto de Menorca	18
2.2.2	Aeropuerto de Vigo	18
2.3	Normativa y Legislación	19
3	Capítulo 3. Concepto y Análisis de una Solución de Torre de Control Remota	20
3.1	Análisis del espacio aéreo: Norte de España	20
3.1.1	Proveedores de Servicios de Navegación Aérea	21
3.2	Análisis del tráfico aéreo: Norte de España	24
3.2.1	Aeropuerto Santiago-Rosalía de Castro	25
3.2.2	Aeropuerto de Asturias	25
3.2.3	Aeropuerto Seve Ballesteros-Santander	26
3.2.4	Aeropuerto de Bilbao	27
3.2.5	Aeropuerto de Vitoria	27
3.2.6	Aeropuerto de San Sebastián	28
3.2.7	Aeropuerto de Pamplona	29
3.2.8	Aeropuerto Logroño-Agoncillo	29
3.3	Implementación Torres de Control Remotas	31
3.3.1	Tecnología a Implementar	32
3.3.2	Aeropuerto de Vitoria	36
3.3.3	Aeropuerto de San Sebastián	38
3.3.4	Aeropuerto de Pamplona	40
3.3.5	Aeropuerto Logroño-Agoncillo	42
3.4	Propuesta Centro de Control	44
3.4.1	Tecnología a Implementar	44
3.4.2	Ubicación Centro de Control	48
3.5	Mantenimiento	49
3.6	Análisis Económico	50
3.6.1	Inversión	51
3.6.2	Costes Operativos	52
3.6.3	Conclusiones Análisis Económico	55
3.7	Análisis de Riesgos	56
4	Capítulo 4. Conclusiones	59
4.1	Trabajo a Futuro	59
5	Capítulo 5. Referencias Bibliográficas	60

Índice de figuras

Figura 1	Torre de control remota	11
Figura 2	Torre de control remota (alt.)	11
Figura 3	Vista desde una torre convencional en condiciones de baja visibilidad (izquierda) en comparación con la misma vista desde una torre remota, realizada por cámaras de infrarrojos y sistemas de detección e identificación de objetos (derecha).	12
Figura 4	Aeronaves detectadas únicamente por los sistemas de vigilancia (izquierda); aeronave detectada únicamente por el sistema de cámaras de la torre remota (centro); aeronave con los datos del sistema de vigilancia y sistema de cámaras fusionados (derecha).	12
Figura 5	Líneas de contorno pintadas sobre pistas y calles de rodaje.	13
Figura 6	Lámpara de Señales	13
Figura 7	Posición de Control en el RTC	15
Figura 8	Posición de Control en el RTC (alt.)	15
Figura 9	Posiciones de Control en Modo Múltiple, RTC	16
Figura 10	Posiciones de Control en Modo Múltiple, RTC (alt.)	16
Figura 11	Torre de control remota, Menorca	18
Figura 12	Torre de control remota, Vigo	18
Figura 13	División FIR Espacio Aéreo Español	20
Figura 14	Aeropuertos del norte de España	21
Figura 15	Prestación de Servicios Red ENAIRE	23
Figura 16	Evolución mensual de las operaciones aéreas del aeropuerto Santiago-Rosalía de Castro (2023)	25
Figura 17	Evolución mensual de las operaciones aéreas del aeropuerto de Asturias (2023)	25
Figura 18	Evolución mensual de las operaciones aéreas del aeropuerto Seve Ballesteros-Santander (2023)	26
Figura 19	Evolución mensual de las operaciones aéreas del aeropuerto de Bilbao (2023)	27
Figura 20	Evolución mensual de las operaciones aéreas del aeropuerto de Vitoria (2023)	27
Figura 21	Evolución mensual de las operaciones aéreas del aeropuerto de San Sebastián (2023)	28
Figura 22	Evolución mensual de las operaciones aéreas del aeropuerto de Pamplona (2023)	29
Figura 23	Evolución mensual de las operaciones aéreas del aeropuerto de Logroño (2023)	29
Figura 24	Arquitectura Sistema de Control Remoto	31
Figura 25	Módulo de cámaras 360º	32
Figura 26	Plataforma Pan-Tilt-Zoom y Lámpara de Señales	33
Figura 27	Sistema de torre de control remota	34
Figura 28	Torre de cámaras de cobertura 180º	35
Figura 29	Plano de Estacionamiento y Atraque de Aeronaves, AIP Vitoria	36
Figura 30	Obstáculos presentes en el recinto aeroportuario de Vitoria	36
Figura 31	Emplazamiento torre convencional existente (rojo) y torre remota (verde) en el Aeropuerto de Vitoria	37
Figura 32	Ubicación cámaras en la pista 04/22 del Aeropuerto de Vitoria	37
Figura 33	Plano de Estacionamiento y Atraque de Aeronaves, AIP San Sebastián	38
Figura 34	Obstáculos presentes en el recinto aeroportuario de San Sebastián	38
Figura 35	Emplazamiento torre convencional existente (rojo) y torre remota (verde) en el Aeropuerto de San Sebastián	39
Figura 36	Ubicación cámaras en la pista 04/22 del Aeropuerto de San Sebastián	39
Figura 37	Plano de Estacionamiento y Atraque de Aeronaves, AIP Pamplona	40
Figura 38	Obstáculos presentes en el recinto aeroportuario de Pamplona	40
Figura 39	Emplazamiento torre convencional existente (rojo) y torre remota (verde) en el Aeropuerto de Pamplona	41
Figura 40	Ubicación cámaras en la pista 15/33 del Aeropuerto de Pamplona	41
Figura 41	Plano de Estacionamiento y Atraque de Aeronaves, AIP Logroño	42
Figura 42	Obstáculos presentes en el recinto aeroportuario de Logroño	42

Figura 43	Emplazamiento torre convencional existente (rojo) y torre remota (verde) en el Aeropuerto Logroño-Agoncillo	43
Figura 44	Ubicación cámaras en la pista 11/29 del Aeropuerto Logroño-Agoncillo	43
Figura 45	Arquitectura Sistema de Control Remoto	44
Figura 46	Tecnología Posición de Control, CWP	45
Figura 47	Ubicación Panel VCCS en la CWP	46
Figura 48	Detalle del Panel VCCS	46
Figura 49	Disposición de la propuesta de RTC	47
Figura 50	Nodos de la Red Española de Supercomputación	48
Figura 51	Ubicación (estimada) del RTC	48
Figura 52	Fuentes de ingresos aeroportuarios por línea de actividad, 2023	50
Figura 53	Costes aeroportuarios por línea de actividad, 2023	50
Figura 54	Schedule ATCO para los aeropuertos de San Sebastián, Pamplona y Logroño	53
Figura 55	Schedule ATCO para el aeropuerto de Vitoria	53

Índice de cuadros

Tabla 1	Proveedores de Servicios de Navegación Aérea certificados por AESA	22
Tabla 2	Número total de pasajeros y operaciones aéreas por aeropuerto (2023)	24
Tabla 3	Número total de pasajeros y operaciones aéreas por aeropuerto (2023)	24
Tabla 4	Características Aeropuerto Santiago-Rosalía de Castro	25
Tabla 5	Características Aeropuerto de Asturias	26
Tabla 6	Características Aeropuerto Seve Ballesteros-Santander	26
Tabla 7	Características Aeropuerto de Bilbao	27
Tabla 8	Características Aeropuerto de Vitoria	28
Tabla 9	Características Aeropuerto de San Sebastián	28
Tabla 10	Características Aeropuerto de Pamplona	29
Tabla 11	Características Aeropuerto Logroño-Agoncillo	30
Tabla 12	Características Módulo 180 ^º	34
Tabla 13	Número de componentes a implementar en el RTC, por aeropuerto	47
Tabla 14	Inversión proyectos torres de control	52
Tabla 15	Estimación costes de salarios ATCO por aeropuerto (Torre Convencional)	54
Tabla 16	Estimación costes de salarios ATCO por aeropuerto (Torre Remota)	54
Tabla 17	Análisis de Riesgos	56

1. Capítulo 1. Introducción

La necesidad de mejorar los procedimientos operacionales dentro del marco de gestión del tráfico aéreo y la evolución de la tecnología han permitido la entrada del concepto de torre de control remota, basado en la sustitución de la torre convencional por un sistema de cámaras, sensores y sistemas de procesamiento de datos capaces de replicar el recinto aeroportuario y el espacio aéreo en las inmediaciones del mismo, permitiendo así la provisión de servicios desde un centro de control remoto.

Las torres de control remotas permiten, adicionalmente, operar en modo múltiple. En otras palabras, controlar varios aeropuertos simultáneamente desde una misma posición de control, lo que supone un aumento en la eficiencia y una reducción en los costes operativos. Asimismo, la implementación de nuevas tecnologías y funcionalidades supone mejoras en la gestión del tráfico aéreo y, por consiguiente, en la seguridad operacional.

1.1. Definición del Problema

En aeropuertos de baja densidad de tráfico aéreo, o aquellos cuya demanda esté definida por picos de actividad, puede resultar complejo encontrar un equilibrio entre los ingresos y los costes aeroportuarios, y por ende, el rendimiento económico de dichos aeropuertos se puede ver minimizado.

La implementación de un sistema de control remoto centraliza los recursos disponibles, habilitándolos únicamente cuando sean necesarios, optimizando así la provisión de servicios de tránsito aéreo y permitiendo, a su vez, la reducción de los costes operativos de las torres de control.

1.2. Objetivos del Proyecto

El objetivo principal del proyecto es el estudio de la viabilidad, tanto técnica como económica, de la implementación de torres de control remotas en varios aeropuertos españoles de baja densidad de tráfico aéreo con el fin de gestionar el mismo desde un único emplazamiento, también de carácter remoto.

Adicionalmente, se considera como objetivo secundario el estudio de la reducción de los costes operativos de una torre de control remota frente a una convencional.

1.3. Estructura del Proyecto

Con el fin de cubrir todos los aspectos relacionados con la implementación de un sistema de control remoto se comenzará aportando una visión general del mismo, con el objetivo de familiarizar y tener un mejor entendimiento acerca de los diferentes elementos que lo componen.

Una vez cerrado el marco teórico, se procederá con el análisis del espacio y tráfico aéreo del norte del país con el fin de identificar aquellos aeropuertos de menor densidad de tráfico aéreo cuya gestión pueda centralizarse desde un único emplazamiento.

Posteriormente, se detallará la tecnología a implementar en los aeropuertos seleccionados y la disposición de la misma dentro del recinto aeroportuario. Asimismo, se definirá la tecnología a implementar en el centro de control remoto y una ubicación aproximada para la construcción del mismo.

Se definirán, a modo de resumen, las actividades de mantenimiento a llevar a cabo y los ciclos de las mismas. Adicionalmente, se llevará a cabo un análisis económico del proyecto, donde se realizarán estimaciones cualitativas y de carácter orientativo acerca de las diferencias en la inversión y costes operativos de una torre de control remota frente a una convencional.

Seguidamente, se realizará un análisis de riesgos donde se expongan las posibles amenazas, de severidad alta, que puedan afectar al funcionamiento del sistema y el plan para mitigar el impacto de las mismas.

Por último, se cerrará el documento con las conclusiones obtenidas tras la realización del proyecto y el trabajo a futuro.

2. Capítulo 2. Estado del Arte

Convencionalmente, el tráfico aéreo en las inmediaciones de los aeropuertos y aeródromos ha sido controlado por las estructuras elevadas situadas en el propio aeropuerto, comúnmente denominadas torres de control. Desde dichas estructuras, los controladores aéreos se basan en referencias visuales y observaciones a través del ojo humano, apoyados por tecnologías como radares y otros sistemas de control, vigilancia y comunicaciones, para poder ofrecer los servicios ATS (*Servicios de Tránsito Aéreo*).

Es debido a dicha dependencia en observaciones visuales que las torres de control tradicionales siempre han sido construidas dentro del recinto aeroportuario. Sin embargo, la necesidad de mejorar la eficiencia de los sistemas de control y la introducción de nuevas tecnologías han permitido la aparición de un nuevo concepto, conocido como torres de control remotas.

2.1. Torres de Control Remotas

El concepto de torre de control remota, RTS (*Remote Tower System*), consiste en sustituir la elevada infraestructura física existente por un sistema de cámaras de alta resolución, sensores y comunicaciones que se encuentran conectados a un centro de control ubicado fuera del espacio aeroportuario, también conocido como RTC (*Remote Tower Center*). Desde dicha ubicación remota se proporcionan tanto servicios de tráfico aéreo, ATS (*Air Traffic Services*), como de información de vuelo de aeródromos, AFIS (*Aerodrome Flight Information Service*), manteniendo el nivel de seguridad que otorgan las torres de control convencionales, e incluso potenciando ciertas capacidades.

A nivel operacional y funcional no supone gran cambio, ya que permite al personal ATCO (*Air Traffic Control Officer*) seguir manteniendo contacto visual con las calles de rodaje, pistas e inmediaciones del aeropuerto, al igual que las comunicaciones necesarias entre la torre y las aeronaves con respecto a las autorizaciones o información METAIS (*Servicio de Información Aeronáutica y Meteorológica*).

El aspecto económico es el mayormente impactado por la implementación de las torres de control remotas, ya que es posible reducir considerablemente los costes operativos e incluso aumentar la eficiencia de los servicios ATS en el caso de gestionar varios aeropuertos desde un mismo centro de control. Asimismo, es una solución óptima y flexible para aquellos aeropuertos con limitaciones de espacio o aquellos cuyo presupuesto no alcance para construir o mejorar una torre de control convencional y las posteriores actividades de mantenimiento requeridas.

Por el contrario, el flamante concepto se presenta acompañado de desafíos e incertidumbre, sobre todo en términos de regulación, certificación, ciberseguridad y fiabilidad de los sistemas, asuntos que serán tratados a lo largo del documento.

2.1.1. Modos de Operación

Independientemente del modo de operación, la implementación de una torre de control remota se puede llevar a cabo tanto en aeropuertos donde actualmente exista una torre convencional como en aquellos donde no haya sido construida todavía. La torre de control convencional podría ser sustituida de manera permanente por una torre de control remota ó, por el contrario, la provisión remota de servicios ATS podría ser de carácter temporal, durante épocas o eventos específicos o con el propósito de contingencia.

Una vez analizados los posibles usos de las torres de control remotas, es posible categorizar su modo de operación en dos:

- **Modo Único.** Este primer modo hace referencia a la provisión de servicios ATS a un único aeropuerto desde un único centro de control (RTC).
- **Modo Múltiple.** El modo múltiple hace referencia a la provisión de servicios ATS a varios aeropuertos de manera simultánea desde un único centro de control (RTC).

2.1.2. Tecnología Torre de Control Remota

Una vez definido el concepto de torre de control remota y las consideraciones a tener en cuenta para su implementación, es necesario conocer la tecnología en la que está basada. Para ello, se hace referencia al documento 'Easy Access Rules for Guidance Material on Remote Aerodrome Air Traffic Services' [1], elaborado y publicado por la Agencia Europea de Seguridad Aérea, EASA.

En dicho documento se distinguen los siguientes elementos y sistemas principales:

■ Sistema Visual de Vigilancia

El sistema visual de vigilancia es el elemento principal de la provisión remota de servicios ATS y está compuesto, a su vez, por dos conceptos operacionales: la presentación visual y la funcionalidad de los prismáticos, también conocida como binocular.

La presentación visual es el elemento que permite reemplazar la vista OTW (*Out the Window*) de una torre convencional, que hace referencia a la vista que tiene el controlador aéreo del área de responsabilidad y sus alrededores. Para ello, se deben instalar torres que contengan una o varias cámaras, en función de la necesidad del aeropuerto y de la tecnología disponible. Las imágenes recopiladas se encuentran conectadas al RTC a través de enlaces de transmisión y sistemas de procesamiento de datos.

El diseño de la torre de cámaras, como acaba de ser mencionado, varía en función de la tecnología disponible. Sin embargo, la disposición más común, que ya ha sido implementada en torres remotas actualmente operativas, consiste en un anillo de cámaras enfocadas en todas las direcciones para poder obtener una cobertura de 360 grados. Asimismo, es posible implementar cámaras adicionales en hot-spots o zonas de conflicto, conocidas como aquellas zonas del aeropuerto donde el riesgo potencial de colisión, incidente o accidente es considerablemente alto.

A continuación se muestra dicha disposición de torres de cámaras.



Figura 1: Torre de control remota
[2]



Figura 2: Torre de control remota (alt.)
[3]

Cabe destacar que el uso de cámaras puede suponer incluso una mejora en la vista que tiene el controlador del área de responsabilidad y, por consiguiente, en la seguridad operacional. Esto se debe a la posibilidad de implementar sistemas de detección e identificación de objetos y cámaras de infrarrojos para potenciar la visión nocturna y condiciones de poca visibilidad, entre otros.

Como ejemplo de lo recién mencionado, se muestra en la Figura 3 cómo podrían quedar representadas las aeronaves, y otros vehículos dentro del recinto aeroportuario, utilizando cámaras infrarrojas y el sistema de detección de objetos en condiciones de baja visibilidad.

Asimismo, en caso de que un objeto invada la pista o cualquier punto crítico, sería rápidamente detectado por el sistema y se podría dar la voz de alarma desde el centro de control.



Figura 3: Vista desde una torre convencional en condiciones de baja visibilidad (izquierda) en comparación con la misma vista desde una torre remota, realizada por cámaras de infrarrojos y sistemas de detección e identificación de objetos (derecha).
[4]

Adicionalmente, el sistema de detección de objetos permite la fusión de los datos recogidos por las cámaras y los sistemas de vigilancia (radares) para mostrar las aeronaves con su etiqueta correspondiente, conteniendo información identificativa acerca de la propia aeronave y su plan de vuelo. A pesar de que la etiqueta no es un concepto novel, puesto que actualmente se encuentra implementado en los sistemas de control de tráfico aéreo, el hecho de fusionar la imagen de la aeronave con su etiqueta podría facilitar significativamente el trabajo del controlador.



Figura 4: Aeronaves detectadas únicamente por los sistemas de vigilancia (izquierda); aeronave detectada únicamente por el sistema de cámaras de la torre remota (centro); aeronave con los datos del sistema de vigilancia y sistema de cámaras fusionados (derecha).
[4]

Por otra parte, se pueden implementar sistemas que pintan virtualmente las líneas de las pistas y calles de rodaje para mejorar la consciencia situacional del controlador en condiciones de poca visibilidad o nocturnas.

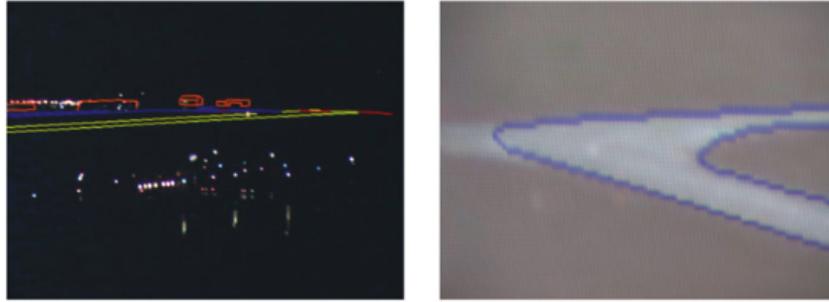


Figura 5: Líneas de contorno pintadas sobre pistas y calles de rodaje.
[4]

Por último, los controladores aéreos en las torres convencionales actuales hacen uso frecuente de los prismáticos, con la finalidad de comprobar el estado de las pistas, la invasión de algún objeto en las mismas, un posible fallo o fuego en algún motor o comprobar el tren de aterrizaje de las aeronaves durante la aproximación. Por consiguiente, al ser una herramienta imprescindible, la provisión remota de servicios ATS debe permitir seguir trabajando con dicha funcionalidad. Con el fin de cumplir con este requisito, se hacen uso de las cámaras conocidas como 'Pan-Tilt-Zoom', que permiten acercar la vista del controlador a un objeto o ubicación específica.

■ Lámpara de Señales

La posibilidad de fallo en las comunicaciones de enlace de datos, CPDLC (*Controller Pilot Data Link Communications*), o la radiotelefonía entre la torre de control y las aeronaves hace necesaria la existencia de un dispositivo comúnmente conocido como lámpara de señales. Dicho artefacto es capaz de emitir haces de luces de tres colores diferentes: verde, rojo y blanco, de manera fija o intermitente. En función del color y la secuencia de la emisión de la señal, el controlador estará dando unas instrucciones u otras. La aeronave, al recibir la señal, puede mover ciertas superficies de control o emitir señales con las luces con el fin de confirmar que ha recibido y entendido la orden.

En el caso de una torre de control remota, se debe implementar la lámpara de señales con los comandos necesarios que permitan que pueda ser controlada de manera remota desde el RTC. Al igual que en el caso de la torre convencional, la lámpara debe poder ser redireccionada hacia la aeronave, vehículo o personal aeroportuario al que aplique la señal. Asimismo, debe poseer un sistema capaz de evaluar su correcto funcionamiento y detectar un posible fallo del mismo.



Figura 6: Lámpara de Señales
[5]

La ubicación de la lámpara de señales debe estar incluida en la AIP del aeropuerto, también conocida como *Publicación de Información Aeronáutica*, para que los pilotos sepan desde dónde pueden recibir las señales en caso de pérdida de comunicación con la torre de control.

■ Sistema de Comunicaciones

Al igual que en el caso convencional, las comunicaciones a establecer desde la torre de control deben ser de dos tipos [6]:

- **Comunicaciones Aire - Tierra.** Comúnmente conocidas como *Servicio Móvil Aeronáutico*, permiten la comunicación entre el piloto y el controlador. Dentro de este servicio se puede distinguir entre las comunicaciones de voz, establecidas a través de canales de radio con una frecuencia asignada, o las comunicaciones CPDLC, establecidas utilizando bandas VHF o satélites y que son mostradas en una interfaz como un mensaje que contiene instrucciones u órdenes.
- **Comunicaciones Tierra - Tierra.** También llamadas *Servicio Fijo Aeronáutico*, hacen referencia a las comunicaciones establecidas entre la torre de control y el personal aeroportuario o aquellos centros que proporcionan servicios de apoyo a las aeronaves, como son información de vuelo, información meteorológica o servicios de emergencia y rescate, entre otros.

El servicio de comunicaciones en una torre de control remota debe ser una réplica al convencional, estableciendo las comunicaciones a través de canales de radio que estarán a su vez conectados al RTC. Asimismo, debe existir un plan de contingencia o un sistema independiente de radios de emergencia entre el aeropuerto y el RTC.

■ Grabación de Datos

En caso de incidente o accidente, las autoridades e investigadores recurren a las grabaciones de voz tanto del servicio móvil como del servicio fijo aeronáutico. Para ello, es necesario implementar en el sistema de control remoto un sistema de grabación de datos capaz de recopilar dichas comunicaciones, al igual que los datos recogidos por los sensores y cámaras del aeropuerto en el momento del incidente. En otras palabras, con el fin de proporcionar información adicional en caso de una investigación, se graban las imágenes de las cámaras al igual que la vista que tendría el controlador y las funcionalidades que pudiese tener activadas en dicho momento.

2.1.3. Centro de Control Remoto

Tras analizar los diferentes elementos que componen una torre de control remota, es necesario conocer la tecnología y disposición presentes en el RTC, o centro de control.

Como ha sido mencionado en varias ocasiones a lo largo del documento, los sistemas y funcionalidades principales requeridos para proveer servicios ATS, como son las comunicaciones, radares y vigilancia, información meteorológica y de vuelo, etc, se encuentran presentes en el nuevo concepto remoto de la misma manera en la que se operaría en una torre convencional. Por ende, la principal diferencia recae en la sustitución de la vista directa OTW por las imágenes recogidas por el sistema visual de vigilancia del área de responsabilidad.

En la Figura 7 se muestra la disposición de lo que sería la CWP (*Controller Working Position*), también conocida como Posición de Control, en un centro de control remoto.



Figura 7: Posición de Control en el RTC
[7]

Tal y como se puede apreciar, las imágenes de las cámaras quedan representadas en varias pantallas, variando en función del tamaño de las mismas, mostrando como solución final la vista que el controlador aéreo vería desde una torre de control convencional ubicada en el interior del propio recinto aeroportuario.

Asimismo, desde la pantalla principal se observan y controlan las herramientas y funcionalidades básicas de control de tráfico aéreo, entre las que se encuentran:

- Información meteorológica y planes de vuelo.
- Información de radares y vigilancia.
- Fichas de progresión de vuelo electrónicas.
- Sistema de control de las cámaras de la torre remota y otros sistemas implementados en el aeropuerto.

En función de la tecnología disponible, dichas funcionalidades pueden ser representadas y controladas desde una única pantalla sectorizada en pequeñas divisiones (Figura 7) ó, por el contrario, pueden ser implementadas en equipos individuales (Figura 8).



Figura 8: Posición de Control en el RTC (alt.)
[8]

Adicionalmente, las comunicaciones por voz se establecen utilizando el sistema de control de comunicaciones, ubicado a la derecha de la pantalla principal, y se controlan a través del panel VCCS (*Voice Communication Control System*).

Cabe destacar que ambas figuras mostradas en la página anterior hacen referencia al modo único de operación, es decir, dicha disposición es usada para proveer servicios ATS a un único aeropuerto. En caso de modo múltiple de operación, las disposición del centro de control estaría compuesta por varias posiciones de control, mostrado en la siguiente figura.



Figura 9: Posiciones de Control en Modo Múltiple, RTC
[9]

En estas circunstancias, cada posición de control se correspondería con un aeropuerto. En caso de ser necesario, por el tamaño del aeropuerto o la demanda del tráfico aéreo, cabe la posibilidad de habilitar varias posiciones de control para el mismo.



Figura 10: Posiciones de Control en Modo Múltiple, RTC (alt.)
[10]

2.1.4. Consideraciones de Implementación

Existen una serie de factores que van a determinar la viabilidad de implementar una torre de control remota en un aeropuerto. De manera general, las consideraciones que van a ser mencionadas a continuación son aplicables a ambos modos de operación, a no ser que se indique lo contrario.

- **Densidad de Tráfico Aéreo.** Al igual que en el caso de la torre de control convencional, es de vital importancia estudiar la densidad de tráfico del aeropuerto, al igual que la complejidad del mismo. En otras palabras, los diferentes tipos de aviones que harán uso de la infraestructura y servicios aeroportuarios, el tipo de operación de dichas aeronaves, la clasificación del espacio aéreo, el tipo de vuelo (Reglas de Vuelo Instrumental, **IFR** / Reglas de Vuelo Visual, **VFR**), las rutas de salidas y llegadas normalizadas por instrumentos (**SID** / **STAR**) u otras consideraciones, como el patrón y los puntos de espera.

Adicionalmente, la complejidad del tráfico aéreo determinará la necesidad de implementar funcionalidades adicionales, como puede ser la binocular.

- **Disposición y Características del Recinto Aeroportuario.** La disposición del entorno aeroportuario es un factor imprescindible a tener en cuenta ya que determinará el número de cámaras a instalar en función del número y largo de pistas, las calles de rodaje y las plataformas o rampas aeroportuarias, entre otros.

Asimismo, se debe estudiar la necesidad de implementar cámaras con funcionalidades adicionales, como en el caso de los puntos críticos o en aquellas zonas donde puedan existir ángulos muertos y espacios de peor visibilidad.

- **Topografía y Climatología de los Aeropuertos.** La topografía que rodea las inmediaciones del aeropuerto, al igual que su ubicación, altitud y proximidad a masas de agua superficiales (ríos, lagos o mares) o montañas, son factores adicionales a tener en cuenta para implementar una torre de control remota, al igual que en el caso de una convencional. De igual forma, es necesario conocer las condiciones climáticas locales y los fenómenos meteorológicos típicos asociados a los factores mencionados anteriormente que puedan afectar a la provisión de los servicios ATS.

Al igual que en el punto anterior, puede ser necesaria la implementación de cámaras con funcionalidades adicionales en caso de climatología adversa que disminuya la visibilidad, con el fin de potenciar la consciencia situacional del controlador aéreo.

Por otro lado, se destaca la importancia de estudiar la fauna local y sus hábitats en el entorno aeroportuario, al igual que el movimiento de la misma. Para ello, se deben tener en cuenta factores como si la especie es diurna o nocturna, migratoria o residente, tipo y altura de vuelo (en el caso de las aves), su capacidad de gregarismo y conocer cómo conviven con el aeropuerto y sus inmediaciones [11].

- **Número y Tamaño de los Aeropuertos.** Este último punto hace referencia al modo de operación múltiple y detalla la importancia de seleccionar aquellos aeropuertos, cuyos servicios ATS se quieran centralizar en un único RTC, en función del número y tamaño de los mismos. No sería recomendable, por motivos de seguridad operacional, proporcionar servicios simultáneamente desde un centro de control remoto a un aeropuerto de gran tamaño y alta demanda, como podría ser Adolfo Suárez - Barajas, y otro aeropuerto de menor densidad, debido a que interactuarían diversos niveles de tráfico aéreo, los horarios de los vuelos en ambos aeropuertos seguramente se acabarían intersectando y la complejidad de la gestión crecería considerablemente.

Por consiguiente, es necesario realizar un estudio del tráfico aéreo de cada aeropuerto, los horarios y la capacidad de los mismos para poder seleccionar de manera adecuada cuáles podrían ser agrupados en un modo múltiple de operación.

2.2. Situación Actual en España

Teniendo en consideración que las torres de control remotas son un concepto que se encuentra en fase de desarrollo y pruebas en gran parte del mundo, actualmente no existe ninguna torre de control remota operativa en España. Bien es cierto, sin embargo, que están prosperando dos proyectos relacionados con el tema en cuestión, descritos a continuación.

2.2.1. Aeropuerto de Menorca

En 2019, AENA y ENAIRE, entidades públicas responsables de la gestión de gran parte de los aeropuertos del país, anunciaron un proyecto que tenía como objetivo sustituir la torre actual convencional del aeropuerto de Menorca por una torre de control remota. El origen de dicho cambio se debe a la finalización de la vida útil de la torre de control convencional, que debía ser renovada o cambiada para el año 2024 [13].

El desarrollo e implementación de este proyecto se vio afectado en el año 2020 por la pandemia causada por el COVID-19, paralizando las actividades y retrasando la puesta en servicio. A día de hoy, el sistema visual de vigilancia, compuesto por los diferentes módulos de cámaras, ya se encuentra implementado en el aeropuerto y en fase de pruebas, al igual que los sistemas de navegación aérea y las instalaciones de los equipos en la nueva dependencia desde donde se gestionará remotamente el tráfico aéreo. Una vez finalizada la fase de pruebas, se deberá formar al personal ATCO que vaya a operar la torre de control remota y se requerirá, posteriormente, la aprobación previa por parte de EASA con el fin de ponerla en servicio.



Figura 11: Torre de control remota, Menorca [12]

2.2.2. Aeropuerto de Vigo

A la par que el aeropuerto de Menorca, el contrato del proyecto del aeropuerto de Vigo fue adjudicado a las empresas FerroNATS y Searidge en 2019, compuesto por dos fases [15].

El objetivo del primer ciclo engloba implementar tanto la torre de control remota en Peinador, Vigo, como el centro de control desde donde gestionar el tráfico aéreo, ubicado dentro del propio recinto aeroportuario. El segundo ciclo tiene como objetivo ampliar la gestión del tráfico aéreo a dos aeropuertos más, todavía por determinar.

A día de hoy, el sistema visual de vigilancia, compuesto por catorce cámaras de alta resolución, dos cámaras Pan-Tilt-Zoom y la lámpara de señales, han sido integradas en el aeropuerto. Al igual que en el caso anterior, los sistemas se encuentran en fase de pruebas y está pendiente la formación de los controladores aéreos que operarán en el centro de control. Una vez finalizados ambos procesos y con la aprobación previa de EASA, se procederá a poner en servicio la torre de control remota en el aeropuerto de Vigo.



Figura 12: Torre de control remota, Vigo [14]

2.3. Normativa y Legislación

Debido al carácter novel asociado al concepto de torre de control remota, las regulaciones y normativas aplicables a la implementación de las mismas son limitadas, por no decir inexistentes. A día de hoy se siguen debatiendo cuestiones emergentes relacionadas con la provisión remota de los servicios ATS y se carecen de directrices globales para regular los estándares a aplicar.

Sin embargo, en los últimos años, diversos documentos guía y prácticas recomendadas para la implementación de esta nueva tecnología han sido emitidos, y queda resumido a continuación el contenido de la versión más actual de cada uno.

En primer lugar, EUROCAE (*European Organization for Civil Aviation Equipment*) emitió en 2021 el documento **EUROCAE ED-240A - Minimum Aviation System Performance Standard for Remote Tower Optical Systems** [16], reemplazando la primera versión emitida en 2018.

Este documento se centra en el sistema visual de vigilancia, específicamente en el desarrollo de la tecnología y sistemas necesarios, al igual que su implementación, con el fin de proporcionar servicios ATS en un ámbito remoto.

Por otro lado, OACI (*Organización de Aviación Civil Internacional*) emitió en 2018 el documento **PANS-ATM, Doc 4444 - Procedures for Air Navigation Services (Air Traffic Management)** [17], donde se detalla cómo debe ser el sistema visual de vigilancia y las capacidades y requisitos mínimos que debe poseer.

En el ámbito europeo, EASA (*European Aviation Safety Agency*) emitió en 2023 el documento **Guidance Material on Remote Aerodrome Air Traffic Services (Issue 3)** [1], reemplazando la primera versión emitida en 2015.

El documento recoge los diferentes modos de operación de las torres de control remotas, los elementos que deben conformar los diferentes sistemas que las componen y recomendaciones o consideraciones relevantes para la implementación de las mismas.

Asimismo, contiene información relacionada con la gestión del cambio de torre convencional a remota, posible impacto de dicho cambio a los demás usuarios del espacio aéreo y consideraciones operacionales y de seguridad.

En el ámbito estadounidense, FAA (*Federal Aviation Agency*), emitió en 2023 los documentos **Remote Tower System Operational Visual Requirements** [18] y **Remote Tower Systems Minimum Functional and Performance Requirements for Non-Federal Applications** [19], donde se detallan los requisitos mínimos del sistema visual, al igual que los requerimientos funcionales y operativos.

Sin embargo, al tratarse de documentación emitida por la FAA, entidad gubernamental responsable de las regulaciones de la aviación civil en Estados Unidos, cualquier referencia que se haga en ambos documentos a dichas regulaciones y normativas no son aplicables al proyecto, ya que difieren de las establecidas por EASA, a las que se debe adherir el estudio. Por consiguiente, ambos documentos se utilizan con carácter informativo.

Tal y como lo escala ICAO, la elaboración y definición de regulación aplicable al concepto de torres de control remotas es un tema a tratar con urgencia, con el fin de asegurar integridad, seguridad y uniformidad tanto en la tecnología a utilizar como en la implementación de la misma y sobre los procedimientos a seguir durante su operación.

En relación a lo aplicable a este proyecto, debido a que en la fecha de elaboración del documento no se han establecido regulaciones o normas aplicables, este se realiza utilizando como referencia los documentos descritos anteriormente.

3. Capítulo 3. Concepto y Análisis de una Solución de Torre de Control Remota

3.1. Análisis del espacio aéreo: Norte de España

Como ha sido mencionado a lo largo del documento, el proyecto tiene como objetivo centralizar la gestión del tráfico aéreo de varios aeropuertos de baja densidad del norte del país en un único centro de control remoto, cuya localización se considerará en apartados posteriores.

Para ello, y a su vez estudiar la viabilidad del proyecto, es necesario realizar un análisis del espacio aéreo y los aeropuertos existentes en dicha zona.

España se encuentra dividida en tres FIR, también conocidos como *Flight Information Regions*: Madrid, Barcelona y Canarias. Tal y como se muestra en la imagen, FIR Madrid es el más extenso, comprendiendo gran parte del país, por lo que el análisis se centrará en el espacio aéreo situado dentro de dicha región de información de vuelo.

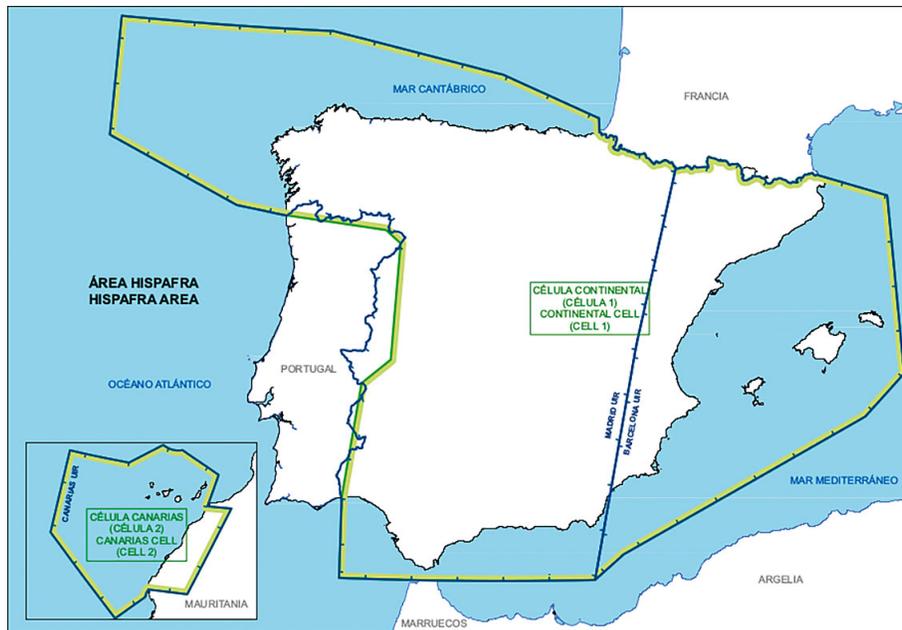


Figura 13: División FIR Espacio Aéreo Español
[20]

Actualmente, y teniendo en consideración únicamente el norte del FIR Madrid, se encuentran un total de catorce aeropuertos distribuidos en ocho comunidades autónomas. A continuación se listan dichos aeropuertos, junto con un mapa que ilustra su localización.

- Aeropuerto de Vigo-Peinador (**LEVX**)
- Aeropuerto Santiago-Rosalía de Castro (**LEST**)
- Aeropuerto de A Coruña (**LECO**)
- Aeropuerto de Asturias (**LEAS**)
- Aeropuerto de Seve Ballesteros-Santander (**LEXJ**)
- Aeropuerto de Bilbao (**LEBB**)

- Aeropuerto de Vitoria (**LEVT**)
- Aeropuerto de San Sebastián (**LESO**)
- Aeropuerto de Pamplona (**LEPP**)
- Aeropuerto de León (**LELN**)
- Aeropuerto de Burgos (**LEBG**)
- Aeropuerto de Logroño-Agoncillo (**LERJ**)
- Aeropuerto de Huesca-Pirineos (**LEHC**)
- Aeropuerto de Zaragoza (**LEZG**)

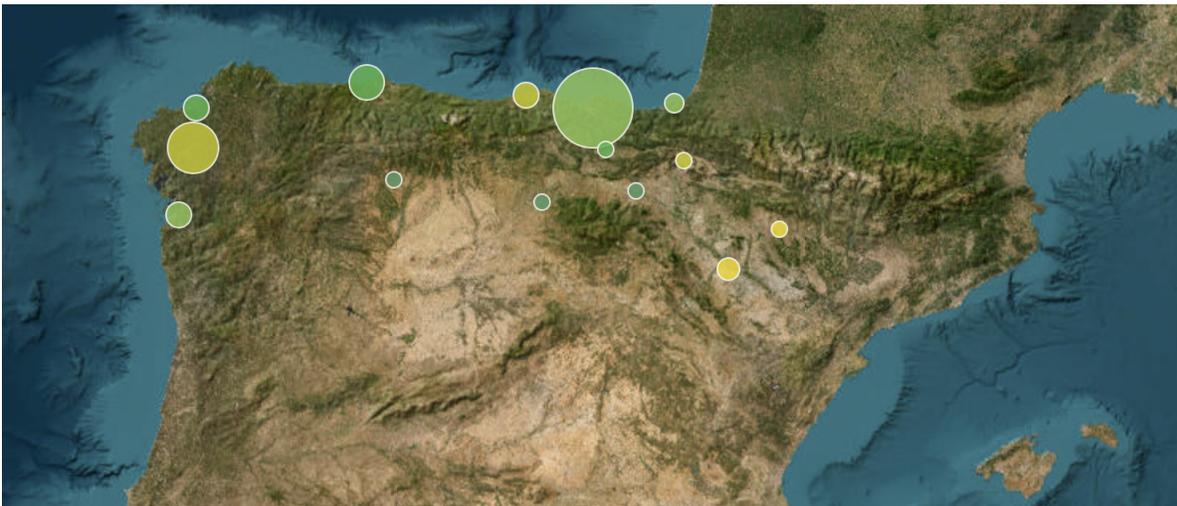


Figura 14: Aeropuertos del norte de España

El tamaño del círculo que ubica cada aeropuerto hace referencia a la densidad de tráfico aéreo existente en el mismo, siendo más pequeño cuanto menor sea el número de vuelos operados por el aeropuerto.

Tal y como se puede apreciar, actualmente existen diversos aeropuertos muy próximos entre sí con una densidad de tráfico relativamente baja. Centralizar la gestión y control del tráfico aéreo desde un mismo emplazamiento supondría una optimización en los recursos, tanto a nivel operativo como a nivel económico.

3.1.1. Proveedores de Servicios de Navegación Aérea

A su vez, es de gran importancia conocer las empresas que proporcionan servicios de navegación aérea. En otras palabras, las organizaciones que llevan a cabo aquellas actividades y proporcionan los servicios necesarios para garantizar una gestión segura de todas las operaciones aéreas.

Dentro de dichas actividades y funciones [21], cabe destacar:

- **Servicios de Tránsito Aéreo (ATS)**. Los objetivos principales de esta actividad son prevenir colisiones entre aeronaves o aeronaves y otros obstáculos, proporcionar información relevante y necesaria para la operación segura y eficaz de los vuelos, y brindar el servicio de alerta, para comunicar y asistir a aquellas aeronaves que se encuentren en situación de socorro.
Dentro de estos actividades se encuentra el servicio de *ATC*, o Control de Tránsito Aéreo, que es el proporcionado por los controladores aéreos y las torres o centros de control, en función de la fase de vuelo.

- Servicios de Comunicación, Navegación y Vigilancia (**CNS**). Tal y como indica el nombre, el servicio CNS está compuesto por Comunicación, servicio encargado de prestar soporte en las comunicaciones tierra-aire (G/A) y tierra-tierra (G/G) entre las dependencias de control y las aeronaves; Navegación, servicio responsable de prestar información acerca del espacio aéreo en el que se encuentra la aeronave; y Vigilancia, servicio que proporciona al controlador aéreo información crucial acerca de las aeronaves bajo su responsabilidad, como son la posición, identificación y altitud de las mismas.
- Servicios de Información Aeronáutica (**AIS**). El objetivo principal de este servicio es aportar y distribuir toda la información y datos aeronáuticos requeridos para que la navegación aérea esté regulada, sea eficaz y segura.
Dentro de la información a suministrar se destacan los Avisos a los Aviadores (NOTAM), Publicaciones de Información Aeronáutica (AIP), Circulares de Información Aeronáutica (AIC) y los Boletines de Información Previa al Vuelo (PIB).
- Gestión del Espacio Aéreo (**ASM**). Este servicio es fundamental para gestionar y optimizar la utilización del espacio aéreo entre los diferentes usuarios que lo componen, ya sean civiles o militares. Con el fin de coordinar las actividades de todos los usuarios se establecen tres niveles, también conocidos como Estratégico, Pre-táctico y Táctico, donde se definen y clasifican dichas actividades en función del uso del espacio aéreo, las necesidades del usuario y la línea temporal (meses de antelación, los días previos a la operación y en tiempo real).
- Gestión de Afluencia del Tráfico Aéreo (**ATFM**). Los objetivos de este servicio pueden ser resumidos en dos: controlar que en todo momento el tráfico aéreo no exceda la capacidad declarada por las autoridades y garantizar un uso optimizado, ordenado y seguro de la capacidad disponible.
- Servicios de Diseño de Procedimientos de Vuelo (**FDP**). Por último, este servicio está destinado al diseño, aprobación y mantenimiento de los procedimientos de vuelo.

A continuación se muestra una tabla que recoge las empresas que actualmente están certificadas por *AESA*, Agencia Estatal de Seguridad Aérea, como aptas para proporcionar Servicios de Navegación Aérea, al igual que los servicios que proporciona cada una de ellas [22].

Cuadro 1: Proveedores de Servicios de Navegación Aérea certificados por AESA

Empresa	ATS	CNS	AIS	ASM	AFTM	FDP
ENAIRE	X	X	X	X	X	X
SAERCO	X	X				
SKYWAY AIR NAVIGATION SERVICES	X	X				
INECO						X
MENESTO AIR NAVIGATION SERVICES (MANS)	X					
PILDO CONSULTING S.L.						X
ALG GLOBAL INFRASTRUCTURE ADVISORS, S.L.U.						X

Esta información es necesaria debido a que, con el fin de cumplir con el objetivo de centralizar el tráfico y gestionar el mismo de un único centro de control remoto, es imprescindible que el proveedor de servicios de navegación aérea de los aeropuertos implicados sea el **mismo**.

Teniendo en consideración que actualmente, y para el espacio aéreo estudiado, el proveedor ENAIRE es el que posee mayor presencia [23], la selección de aeropuertos se realizará utilizando como guía la siguiente imagen, donde se muestra la red de provisión de servicios de ENAIRE [24].



Figura 15: Prestación de Servicios Red ENAIRE

Resaltados en rojo quedan representados aquellos aeropuertos, de los catorce mencionados con anterioridad, cuyos servicios ATS son provistos por ENAIRE. En los seis aeropuertos restantes, representados en la figura con una antena, ENAIRE únicamente ofrece servicios CNS, siendo las torres de control gestionadas por otros proveedores de servicios.

Por consiguiente, al finalizar este primer análisis del espacio aéreo del norte de España, se concluye que los ocho posibles aeropuertos a seleccionar para la realización del proyecto serían:

- Aeropuerto Santiago-Rosalía de Castro (**LEST**)
- Aeropuerto de Asturias (**LEAS**)
- Aeropuerto de Seve Ballesteros-Santander (**LEXJ**)
- Aeropuerto de Bilbao (**LEBB**)
- Aeropuerto de Vitoria (**LEVT**)
- Aeropuerto de San Sebastián (**LESO**)
- Aeropuerto de Pamplona (**LEPP**)
- Aeropuerto de Logroño-Agoncillo (**LERJ**)

Sin embargo, como ha sido mencionado en el Capítulo 2 del documento, existen una serie de consideraciones, como la densidad de tráfico aéreo, que deben ser analizados con el fin de estudiar la viabilidad de implementar torres de control remotas en dichos aeropuertos. Por consiguiente, la decisión final de los aeropuertos a seleccionar se tomará tras el análisis del tráfico aéreo, estudiado en la siguiente sección.

3.2. Análisis del tráfico aéreo: Norte de España

Una vez seleccionados los ocho posibles aeropuertos cuya gestión se podría centralizar, es necesario estudiar el tráfico aéreo de dichas dependencias para analizar la viabilidad de asumir todo el tráfico desde un único centro de control remoto.

En la tabla a continuación se resumen el número total de pasajeros y operaciones aéreas, durante el año 2023, de los ocho aeropuertos mencionados anteriormente, extraído de las estadísticas de Aena [25].

Cuadro 2: Número total de pasajeros y operaciones aéreas por aeropuerto (2023)

Aeropuerto	Número de Pasajeros (Total)	Número de Operaciones (Total)
Santiago-Rosalía de Castro	3 537 445	19 409
Asturias	1 974 850	11 642
Seve Ballesteros-Santander	1 242 089	8 308
Bilbao	6 336 441	28 713
Vitoria	309 929	7 913
San Sebastián	482 662	5 101
Pamplona	197 509	4 732
Logroño-Agoncillo	16 728	1 709
TOTAL	14 097 653	87 527

Para añadir más contexto a dichas cifras y poder situarlas, en la siguiente tabla se muestran el número total de pasajeros y operaciones aéreas, durante el mismo año, de los aeropuertos más transitados del país.

Cuadro 3: Número total de pasajeros y operaciones aéreas por aeropuerto (2023)

Aeropuerto	Número de Pasajeros (Total)	Número de Operaciones (Total)
Adolfo Suárez Madrid-Barajas	60 220 984	389 179
Barcelona-El Prat J.T.	49 909 544	318 957
Palma de Mallorca	31 105 987	228 920
Málaga-Costa del Sol	22 344 373	161 684
Alicante-Elche Miguel Hernández	15 747 678	100 547

A primera vista, comparando los datos con el aeropuerto de Alicante y teniendo en cuenta únicamente el número de pasajeros y operaciones aéreas, se podría declarar que sería viable asumir el tráfico aéreo de los ocho aeropuertos desde un único centro de control. Sin embargo, esta afirmación no se puede considerar del todo correcta debido a que se tratan de ocho aeropuertos diferentes, cuya gestión, planificación y coordinación difieren uno del otro, a diferencia del aeropuerto de Elche.

Por consiguiente, para el caso aplicable al proyecto, es necesario analizar individualmente los horarios, las rutas y el tipo de vuelo de los ocho aeropuertos propuestos para estudiar posibles incompatibilidades entre ellos y realizar así un segundo filtro, con el fin de tomar una decisión final acerca de los aeropuertos a seleccionar. Para ello, en las siguientes subsecciones se analizan individualmente los ocho aeropuertos y sus características.

Con el objetivo de determinar una media diaria de salidas y llegadas para cada aeropuerto, se hace uso de los informes detallados proporcionadas por Aena [26], donde se detallan el número de operaciones en el año 2023 por tipo de movimiento (salida o llegada).

Asimismo, la información acerca de los horarios, tránsito autorizado o instalaciones de comunicación ATS se obtiene con la AIP de cada aeropuerto.

3.2.1. Aeropuerto Santiago-Rosalía de Castro

Durante el año 2023 se realizaron un total de 19 409 operaciones aéreas: 9 710 salidas y 9 699 llegadas. En la Figura 16 se muestra la evolución mensual de las operaciones totales durante dicho año.



Figura 16: Evolución mensual de las operaciones aéreas del aeropuerto Santiago-Rosalía de Castro (2023)

A continuación se resumen las características más relevantes para la toma de decisión [27].

Cuadro 4: Características Aeropuerto Santiago-Rosalía de Castro

Aeropuerto Santiago-Rosalía de Castro (LEST)	
Horario de Operación	H24
Vuelos al día (media)	Salidas: 27
	Llegadas: 27
Tránsito Autorizado	IFR/VFR
Número de Pistas	1 (17/35)
Instalaciones de Comunicación ATS	APP, TWR, ATIS y D-ATIS

3.2.2. Aeropuerto de Asturias

Durante el año 2023 se realizaron un total de 11 642 operaciones aéreas: 5 821 salidas y 5 821 llegadas. En la Figura 17 se muestra la evolución mensual de las operaciones totales durante dicho año.



Figura 17: Evolución mensual de las operaciones aéreas del aeropuerto de Asturias (2023)

A continuación se resumen las características más relevantes para la toma de decisión [28].

Cuadro 5: Características Aeropuerto de Asturias

Aeropuerto de Asturias (LEAS)	
Horario de Operación	Invierno: 05:40 - 22:45
	Verano: 04:40 - 21:45
Vuelos al día (media)	Salidas: 16
	Llegadas: 16
Tránsito Autorizado	IFR/VFR
Número de Pistas	1 (11/29)
Instalaciones de Comunicación ATS	APP y TWR

3.2.3. Aeropuerto Seve Ballesteros-Santander

Durante el año 2023 se realizaron un total de 8 308 operaciones aéreas: 4 173 salidas y 4 135 llegadas. En la Figura 18 se muestra la evolución mensual de las operaciones totales durante dicho año.



Figura 18: Evolución mensual de las operaciones aéreas del aeropuerto Seve Ballesteros-Santander (2023)

A continuación se resumen las características más relevantes para la toma de decisión [29].

Cuadro 6: Características Aeropuerto Seve Ballesteros-Santander

Aeropuerto Seve Ballesteros-Santander (LEXJ)	
Horario de Operación	Invierno: 05:30 - 22:00
	Verano: 04:30 - 21:00
Vuelos al día (media)	Salidas: 11
	Llegadas: 11
Tránsito Autorizado	IFR/VFR
Número de Pistas	1 (11/29)
Instalaciones de Comunicación ATS	APP, TWR, ATIS y D-ATIS

3.2.4. Aeropuerto de Bilbao

Durante el año 2023 se realizaron un total de 28 713 operaciones aéreas: 14 372 salidas y 14 341 llegadas. En la Figura 19 se muestra la evolución mensual de las operaciones totales durante dicho año.



Figura 19: Evolución mensual de las operaciones aéreas del aeropuerto de Bilbao (2023)

A continuación se resumen las características más relevantes para la toma de decisión [30].

Cuadro 7: Características Aeropuerto de Bilbao

Aeropuerto de Bilbao (LEBB)	
Horario de Operación	Invierno: 05:45 - 21:30
	Verano: 04:45 - 21:30
Vuelos al día (media)	Salidas: 39
	Llegadas: 39
Tránsito Autorizado	IFR/VFR
Número de Pistas	10/28
	12/30
Instalaciones de Comunicación ATS	APP, TWR, GMC, ATIS y D-ATIS

3.2.5. Aeropuerto de Vitoria

Durante el año 2023 se realizaron un total de 7 913 operaciones aéreas: 3 944 salidas y 3 969 llegadas. En la Figura 20 se muestra la evolución mensual de las operaciones totales durante dicho año.

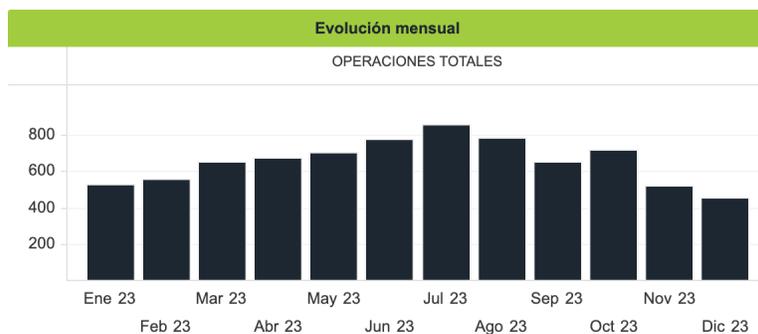


Figura 20: Evolución mensual de las operaciones aéreas del aeropuerto de Vitoria (2023)

A continuación se resumen las características más relevantes para la toma de decisión [31].

Cuadro 8: Características Aeropuerto de Vitoria

Aeropuerto de Vitoria (LEVT)	
Horario de Operación	H24
Vuelos al día (media)	Salidas: 11
	Llegadas: 11
Tránsito Autorizado	IFR/VFR
Número de Pistas	1 (04/22)
Instalaciones de Comunicación ATS	APP/TWR, ATIS y D-ATIS

3.2.6. Aeropuerto de San Sebastián

Durante el año 2023 se realizaron un total de 5 101 operaciones aéreas: 2 557 salidas y 2 544 llegadas. En la Figura 21 se muestra la evolución mensual de las operaciones totales durante dicho año.

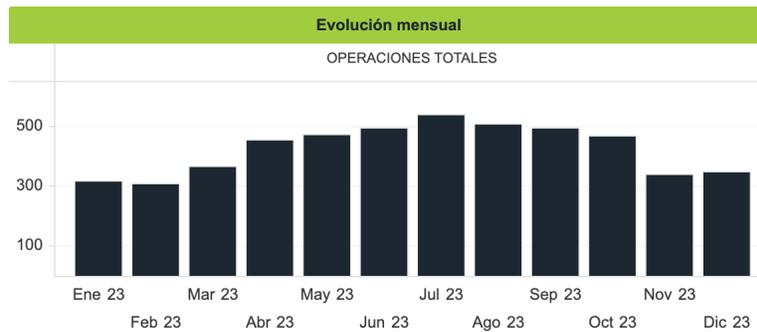


Figura 21: Evolución mensual de las operaciones aéreas del aeropuerto de San Sebastián (2023)

A continuación se resumen las características más relevantes para la toma de decisión [32].

Cuadro 9: Características Aeropuerto de San Sebastián

Aeropuerto de San Sebastián (LESO)	
Horario de Operación	Invierno: 06:30 - 20:45
	Verano: 05:30 - 19:45
Vuelos al día (media)	Salidas: 7
	Llegadas: 7
Tránsito Autorizado	IFR/VFR
Número de Pistas	1 (04/22)
Instalaciones de Comunicación ATS	APP/TWR

3.2.7. Aeropuerto de Pamplona

Durante el año 2023 se realizaron un total de 4 732 operaciones aéreas: 2 386 salidas y 2 346 llegadas. En la Figura 22 se muestra la evolución mensual de las operaciones totales durante dicho año.



Figura 22: Evolución mensual de las operaciones aéreas del aeropuerto de Pamplona (2023)

A continuación se resumen las características más relevantes para la toma de decisión [33].

Cuadro 10: Características Aeropuerto de Pamplona

Aeropuerto de Pamplona (LEPP)	
Horario de Operación	Invierno: 05:30 - 22:45 Verano: 04:30 - 21:45
Vuelos al día (media)	Salidas: 7 Llegadas: 6
Tránsito Autorizado	IFR/VFR
Número de Pistas	1 (15/33)
Instalaciones de Comunicación ATS	APP/TWR

3.2.8. Aeropuerto Logroño-Agoncillo

Durante el año 2023 se realizaron un total de 1 709 operaciones aéreas: 866 salidas y 843 llegadas. En la Figura 23 se muestra la evolución mensual de las operaciones totales durante dicho año.



Figura 23: Evolución mensual de las operaciones aéreas del aeropuerto de Logroño (2023)

A continuación se resumen las características más relevantes para la toma de decisión [34].

Cuadro 11: Características Aeropuerto Logroño-Agoncillo

Aeropuerto Logroño-Agoncillo (LERJ)	
Horario de Operación	Invierno: 06:00 - 21:00
	Verano: 05:30 - 20:00
Vuelos al día (media)	Salidas: 2
	Llegadas: 2
Tránsito Autorizado	IFR/VFR
Número de Pistas	1 (11/29)
Instalaciones de Comunicación ATS	APP/TWR

Como ha sido mencionado anteriormente, la densidad de tráfico y los horarios de los vuelos son factores importantes a tener en consideración a la hora de implementar torres de control remotas en modo de operación múltiple. Por consiguiente, una vez analizados los ocho posibles aeropuertos, se toma la decisión de descartar los aeropuertos de Bilbao, Santiago y Asturias por la complejidad de la coordinación y gestión de los vuelos, ya que al poseer una densidad de tráfico considerablemente elevada, los horarios se solapan con el resto de aeropuertos.

Bien es cierto que los controladores aéreos son entrenados para coordinar varios vuelos de manera simultánea. Sin embargo, en este caso dicha gestión implicaría que los vuelos operasen en espacios aéreos, aeropuertos y canales de comunicación diferentes, dificultando el trabajo de los ATCOs e incluso comprometiendo la seguridad operacional.

Por otro lado, de los cinco aeropuertos restantes, se descarta el aeropuerto de Santander por su localización. A pesar de que todavía no se ha determinado el emplazamiento del RTC, estudiado más adelante en el punto 3.4.2, una variable crucial en las torres de control remotas es el concepto de **latencia**.

A pesar de que la infraestructura del RTC no tiene por qué situarse cerca de los aeropuertos implicados, uno de los factores que van a influir en el valor de ese tiempo de transmisión de datos es la distancia existente entre los dos puntos entre los cuales se quiere establecer la comunicación, existiendo una relación proporcional entre dicha distancia y la latencia de la señal [35]. Adicionalmente, es recomendable que el centro de control remoto no se sitúe demasiado lejos de los aeropuertos involucrados por asuntos relacionados con la fiabilidad de la tecnología y los sistemas.

Por consiguiente, teniendo en consideración la ubicación de los aeropuertos de Logroño, Vitoria, San Sebastián y Pamplona, se podría cuadrar una ubicación céntrica para el RTC, situándolo relativamente cerca de los cuatro. En dicho caso, el aeropuerto de Santander quedaría geográficamente alejado del centro de control remoto, motivo por el cual se toma la decisión de descartarlo como opción para la realización del proyecto.

Finalmente, los cuatro aeropuertos seleccionados para implementar torres de control remotas y centralizar la gestión del tráfico aéreo en un único RTC son:

- Aeropuerto de Vitoria (**LEVT**)
- Aeropuerto de San Sebastián (**LESO**)
- Aeropuerto de Pamplona (**LEPP**)
- Aeropuerto de Logroño-Agoncillo (**LERJ**)

3.3. Implementación Torres de Control Remotas

En el siguiente apartado se detalla la disposición de la propuesta de torre de control remota en los cuatro aeropuertos seleccionados, al igual que la tecnología necesaria en cada caso. Para ello, se hará uso de las AIPs con el fin de seleccionar las ubicaciones más óptimas en cada aeropuerto.

Previamente a implementar las torres de control remotas, es importante conocer los elementos que componen la arquitectura general del sistema de control remoto, compuesto por los equipos del aeropuerto local, los elementos del centro de control remoto y una red de transmisión de datos que une a ambos, tal y como se muestra a continuación.

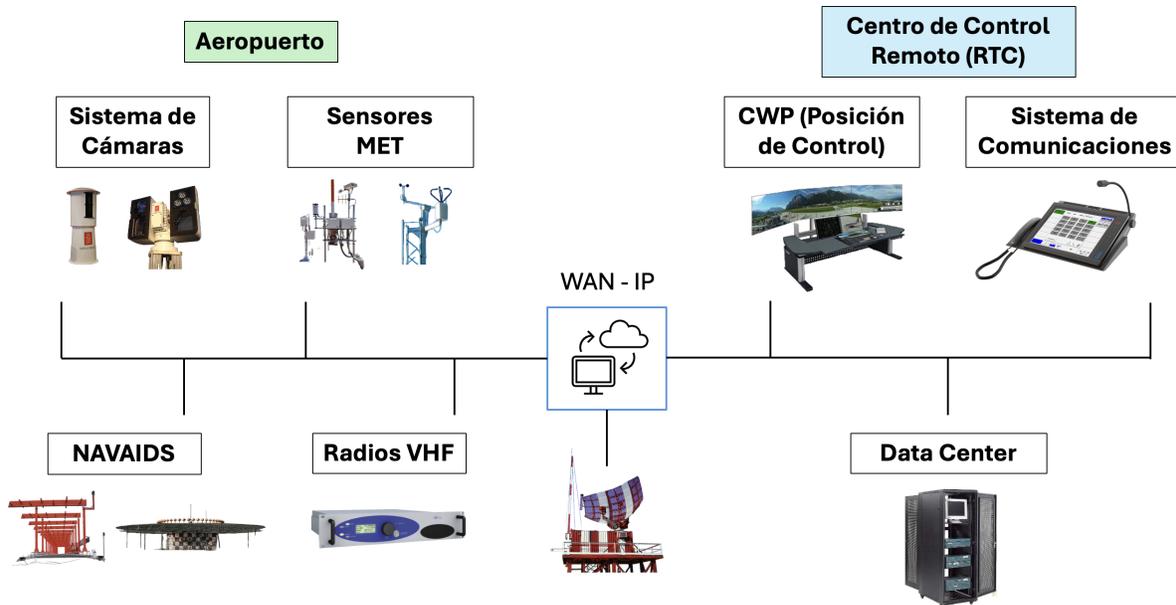


Figura 24: Arquitectura Sistema de Control Remoto

En este apartado se tratarán los elementos necesarios a implementar en el ámbito aeroportuario, resumidos a continuación, siendo el resto de elementos descritos en el punto 3.4 del documento.

- **Sensores Meteorológicos.** La torre de control debe conocer, en tiempo real, los parámetros meteorológicos de interés del aeropuerto, motivo por el cual es necesario implementar sensores responsables de realizar dichas mediciones. Sin embargo, en los aeropuertos actuales ya existe el Sistema Automático de Observación Meteorológica (AWOS), por lo que no sería necesario implementar sensores adicionales en los cuatro aeropuertos de estudio.
- **Ayudas a la Navegación (NAVAIDS).** Dispositivos visuales e instrumentales que proporcionan información de orientación punto a punto o datos de posición a las aeronaves. En el recinto aeroportuario son ejemplos comunes de ayudas visuales los letreros sobre el pavimento, las luces de pista y rodaje y las señales de orientación; y son ejemplos de ayudas instrumentales los VOR, sistema de aproximación ILS o las luces PAPI [36]. Al igual que en el caso anterior, dichas ayudas ya se encuentran implementadas en los aeropuertos, por lo que no sería necesario implementarlo en este caso de estudio.
- **Radios.** Dispositivos necesarios para permitir la comunicación entre la torre de control remota y el personal del aeropuerto. Al igual que en los casos anteriores, los aeropuertos ya disponen de sistema de comunicaciones y radio, por lo que no sería necesario implementarlo.
- **Sistema de Cámaras.** Elemento principal de la torre de control remota y, por consiguiente, el único elemento que sería necesario implementar en los cuatro aeropuertos de estudio. Dicho sistema se describe a continuación.

3.3.1. Tecnología a Implementar

Previamente a diseñar el layout de cada aeropuerto, se describen los elementos tecnológicos que componen el sistema de cámaras de una torre de control remota.

■ Módulo Cámara 360°

El elemento principal del sistema, responsable de proporcionar la vista OTW en una torre de control remota, es el módulo de cámaras de 360°. En este caso, el sistema se encuentra montado sobre una plataforma giratoria y está compuesto por dos cámaras: VIS 360°, que recoge la luz visible, o lo que el ojo humano es capaz de captar; e IR 360°, una cámara térmica que proporciona capacidades infrarrojas para situaciones de peor visibilidad. Las imágenes de ambas cámaras son integradas y fusionadas en una sola, proyectada en el centro de control de manera continua y uniforme, evitando el cosido de imágenes.

La plataforma rota con una frecuencia de rotación de cinco hercios (5 Hz) y las cámaras capturan cinco imágenes 360°, de alta resolución, por segundo. Dicha resolución se corresponde con una agudeza visual de 1.0 o una visión 20/20 del ojo humano, que son indicadores de la capacidad de poder identificar correctamente los objetos e imágenes percibidos. En este caso, se trataría de una agudeza visual del 100 %.

Asimismo, el módulo incorpora un sistema capaz de reducir los efectos deslumbrantes de la luz solar, ajustando la sensibilidad y el brillo en función de la misma, evitando así que la vista de los ATCOs se vea perjudicada.

Por último, las ventanas del módulo son calefactables y poseen limpiaparabrisas, protegiendo las cámaras de los fenómenos meteorológicos y los efectos adversos que puedan tener estos sobre las imágenes grabadas.



Figura 25: Módulo de cámaras 360°
[37]

■ Pan-Tilt-Zoom y Lámpara de Señales

En segundo lugar, es necesario el módulo que contiene la funcionalidad binocular y la lámpara de señales, entre otros. Para ello, se utiliza la plataforma mostrada en la Figura 26, conocida como PTP, que integra las siguientes funcionalidades en un único sistema:

- **Cámara Pan-Tilt-Zoom:** También conocida como PTZ. Se opera utilizando un joystick y permite acercar la imagen a un punto específico deseado, sustituyendo los prismáticos en una torre de control convencional.
- **Cámara Pan-Tilt Infrarrojos:** Al igual que en el módulo de cámaras 360°, la plataforma PTP posee la capacidad de diferenciar contrastes térmicos con el fin de detectar animales, personas, vehículos u otros objetos.
- **Telémetro Láser:** Funcionalidad integrada con las imágenes de las cámaras que fusiona las capacidades de medir distancias entre objetos con el rastreo del movimiento de los mismos, proporcionando consciencia situacional al controlador. La longitud de onda se encuentra fuera del espectro visible, por lo que es seguro para el ojo humano.
- **Lámpara de Señales:** Esta funcionalidad, al igual que el telémetro, se encuentra integrada con las imágenes de las cámaras y permite al operador direccionar la lámpara hacia el objeto deseado. Como ha sido mencionado anteriormente en el documento, las señales pueden ser blancas, rojas y verdes con patrones o secuencias predeterminadas.



Figura 26: Plataforma Pan-Tilt-Zoom y Lámpara de Señales
[38]

La plataforma PTP puede ser ajustada dentro de un rango de elevación entre -20° y 80° . Asimismo, la funcionalidad binocular (PTZ) posee un rango de operación y cobertura de 95° horizontalmente y 71° en la vertical.

Adicionalmente, tal y como se puede apreciar en la imagen, las ventanas de la plataforma PTP también poseen limpiaparabrisas, para mitigar los efectos de la lluvia u otros fenómenos meteorológicos.

Con el fin de simplificar la implementación de la torre de control remota, es posible unificar el módulo de cámaras 360° con la plataforma PTP, tal y como se muestra en la imagen a continuación.



Figura 27: Sistema de torre de control remota
[39]

Por consiguiente, la torre de control remota que se implementará en las secciones siguientes se corresponde con el sistema recién mostrado, proporcionando todos los servicios desde una misma ubicación, tal y como se realizaría desde una torre de control convencional.

■ Cámara 180°

Por último, se van a implementar torres de cámaras adicionales en hot-spots o zonas de conflicto, como pueden ser las entradas a las pistas. En dichos casos, el módulo de cámaras cubrirá un campo de visión de 180°. A continuación se detallan las características de las cámaras y se muestra una imagen de cómo luciría la torre adicional.

Cuadro 12: Características Módulo 180°

r-TWR MEP 180	
Número de cámaras	5 unidades
Cobertura (Horizontal)	180°
Cobertura (Vertical)	+/- 13°
Rango de temperaturas de operación	-40° - +55°
Limpiaparabrisas y tiempo de operación	Sí (1s)
Velocidad Máx. soportada por el mástil	210 km/h



Figura 28: Torre de cámaras de cobertura 180°
[40]

Por otro lado, el criterio del emplazamiento de la torre de control remota se asemeja al convencional, retirando ciertos factores humanos, como son la ergonomía y aquellos relevantes a la comodidad de los controladores aéreos. A continuación se resumen los aspectos a tener en consideración para implementar la torre de control.

- **Impacto en los Sistemas CNS.** La torre de control debe ser ubicada donde no interfiera ni degrade el funcionamiento de los equipos de comunicación, navegación y vigilancia.
- **Requisitos de Visibilidad.** La vista proporcionada desde la torre de control debe ser despejada, sin obstáculos, permitiendo observar las pistas de aterrizaje, las calles de rodaje, las rampas/plataformas y cualquier otro área de maniobras, incluyendo el espacio aéreo en las inmediaciones del aeropuerto.
- **Requisitos Operacionales.** Se debe tener en consideración la orientación de la torre de control, el acceso a la misma y el clima del aeropuerto.

Con la tecnología y dichas consideraciones en mente, se procede a diseñar el emplazamiento de la torre de control remota en los cuatro aeropuertos seleccionados.

3.3.2. Aeropuerto de Vitoria

El aeropuerto de Vitoria posee dos plataformas de estacionamiento y atraque de aeronaves, situando la terminal de pasajeros en el Apron 1 y la torre de control actual en el Apron 2. A continuación se muestra una imagen que detalla el layout del aeropuerto, extraído de la AIP del mismo.

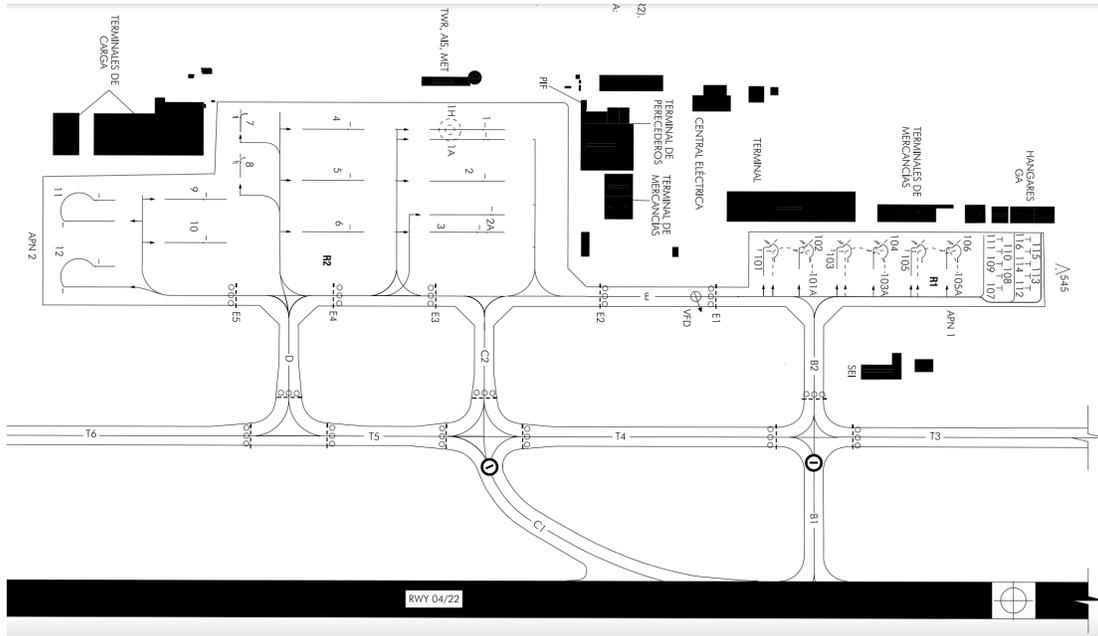


Figura 29: Plano de Estacionamiento y Atraque de Aeronaves, AIP Vitoria [41]

Con el fin de cumplir con los requisitos de visibilidad para implementar la torre de control, se hace uso del documento que detalla los obstáculos presentes en el aeropuerto y sus inmediaciones [42], recogido en la AIP. A continuación se muestra el layout tras representar las coordenadas de los obstáculos más relevantes, y su altura correspondiente, para el emplazamiento de la torre de control remota.



Figura 30: Obstáculos presentes en el recinto aeroportuario de Vitoria

Tal y como se puede apreciar, resulta complejo ubicar la torre de control remota con el resto de edificios existentes, ya que el aeropuerto posee varios hangares y terminales de carga, además de la terminal de pasajeros y torre de control convencional/METAIS. Bien es cierto que existe un pequeño claro entre el edificio de la torre de control actual y la terminal de perecederos. Sin embargo, tal y como se detalla en la lista de obstáculos, existe un poste de iluminación de 27,513 m de altura que obstaculizaría la vista del controlador, motivo por el cual se descarta dicha ubicación.

Por consiguiente, dada la sencillez de construcción de una torre de control remota, se toma la decisión de ubicarla entre el Apron 2 y las calles de rodaje de pista. Desde dicho punto, se podrían observar todos los elementos aeroportuarios: plataformas de atraque, calles de rodaje, pista de aterrizaje y el espacio aéreo en las inmediaciones del aeropuerto.

En la imagen a continuación se muestra el emplazamiento de la torre convencional actual, rojo, y la ubicación propuesta para la torre de control remota, verde.



Figura 31: Emplazamiento torre convencional existente (rojo) y torre remota (verde) en el Aeropuerto de Vitoria

Por último, tal y como ha sido mencionado anteriormente, se planifica instalar torres de cámaras adicionales, de cobertura 180°, en los extremos de la pista de aterrizaje como medida de redundancia y soporte adicional. En un principio, debido a la ubicación de la torre de control remota (360°) y su cercanía con la cabecera 04 de la pista de aterrizaje, se descarta implementar una segunda torre de cámaras en dicha zona, instalando únicamente una torre de cámaras adicional en la cabecera 22 de la pista.

La siguiente figura muestra la ubicación de la segunda torre de cámaras que dará soporte adicional, en caso de que fuera necesario, en las maniobras y operaciones que tengan lugar en dicho extremo.

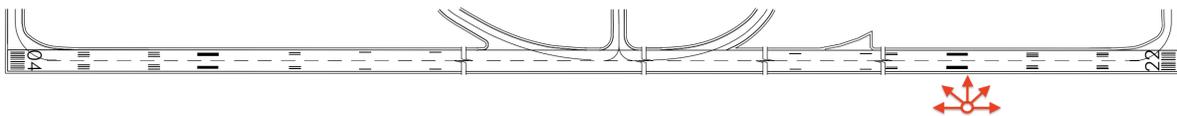


Figura 32: Ubicación cámaras en la pista 04/22 del Aeropuerto de Vitoria
[43]

3.3.3. Aeropuerto de San Sebastián

El aeropuerto de San Sebastián posee una plataforma de estacionamiento y atraque de aeronaves, rodeada por la terminal de pasajeros, la torre de control convencional y varios edificios aeroportuarios como hangares e instalación de combustible.

A continuación se muestra una imagen que detalla el layout del aeropuerto, extraído de la AIP del mismo.

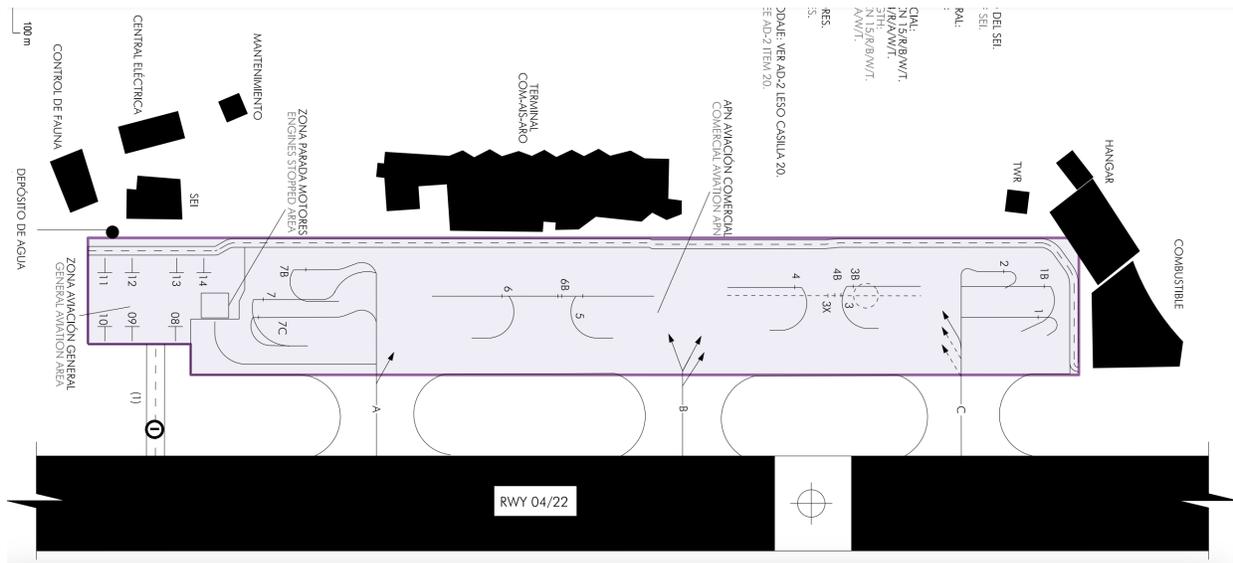


Figura 33: Plano de Estacionamiento y Atraque de Aeronaves, AIP San Sebastián [44]

Con el fin de cumplir con los requisitos de visibilidad para implementar la torre de control, se hace uso del documento que detalla los obstáculos presentes en el aeropuerto y sus inmediaciones [45], recogido en la AIP. A continuación se muestra el layout tras representar las coordenadas de los obstáculos más relevantes, y su altura correspondiente, para el emplazamiento de la torre de control remota.



Figura 34: Obstáculos presentes en el recinto aeroportuario de San Sebastián

En este caso, existe un claro entre la terminal y la torre de control convencional actual, situada a la derecha del todo de la plataforma. Al no haber presencia de obstáculos en dicha zona, se define como el emplazamiento para la torre de control remota.

En la imagen a continuación se muestra el emplazamiento de la torre convencional actual, rojo, y la ubicación propuesta para la torre de control remota, verde.

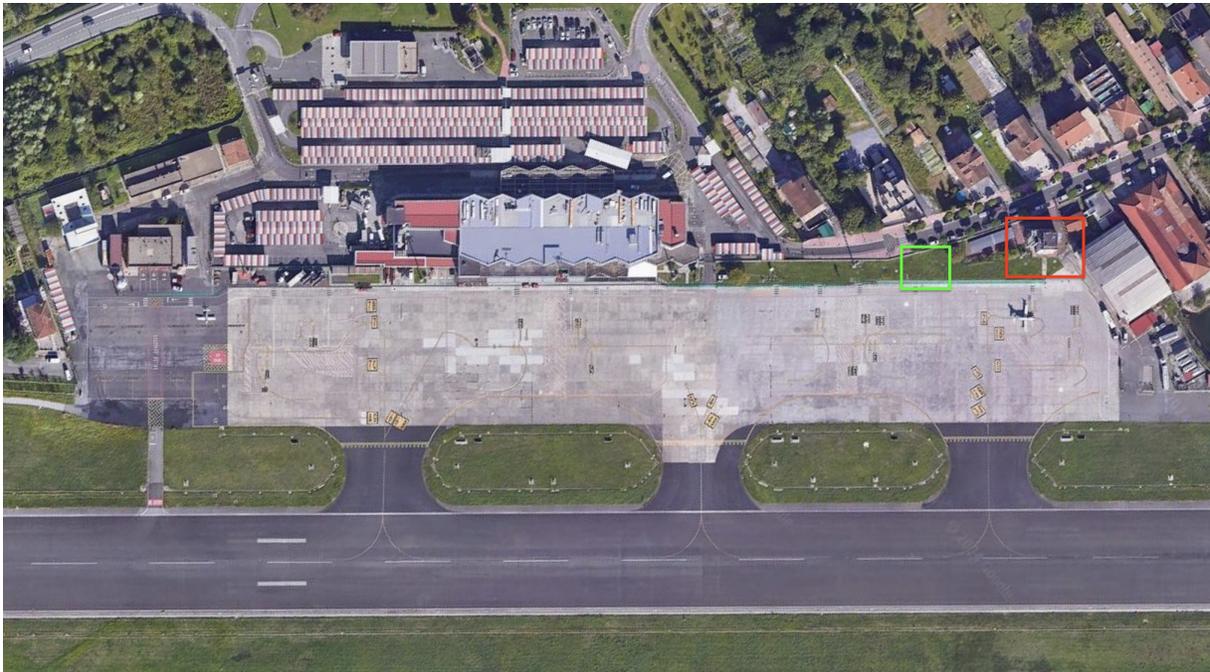


Figura 35: Emplazamiento torre convencional existente (rojo) y torre remota (verde) en el Aeropuerto de San Sebastián

Por último, como la torre de control remota (360°) poseería una ubicación céntrica con respecto a ambos extremos de la pista de aterrizaje, se planifican instalar dos torres de cámaras adicionales, de cobertura 180° , en ambas cabeceras de la misma.

La siguiente figura muestra la ubicación de las torres de cámaras adicionales que darán soporte, en caso de que fuera necesario, en las maniobras y operaciones de aterrizaje y despegue.

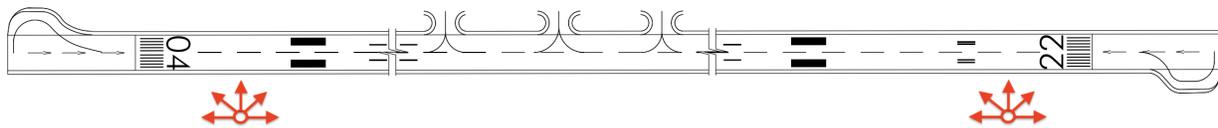


Figura 36: Ubicación cámaras en la pista 04/22 del Aeropuerto de San Sebastián
[46]

3.3.4. Aeropuerto de Pamplona

El aeropuerto de Pamplona posee una plataforma de estacionamiento y atraque de aeronaves, rodeada por la terminal de pasajeros, la torre de control convencional, la instalación de combustible y una escuela de pilotos, entre otros.

A continuación se muestra una imagen que detalla el layout del aeropuerto, extraído de la AIP del mismo.

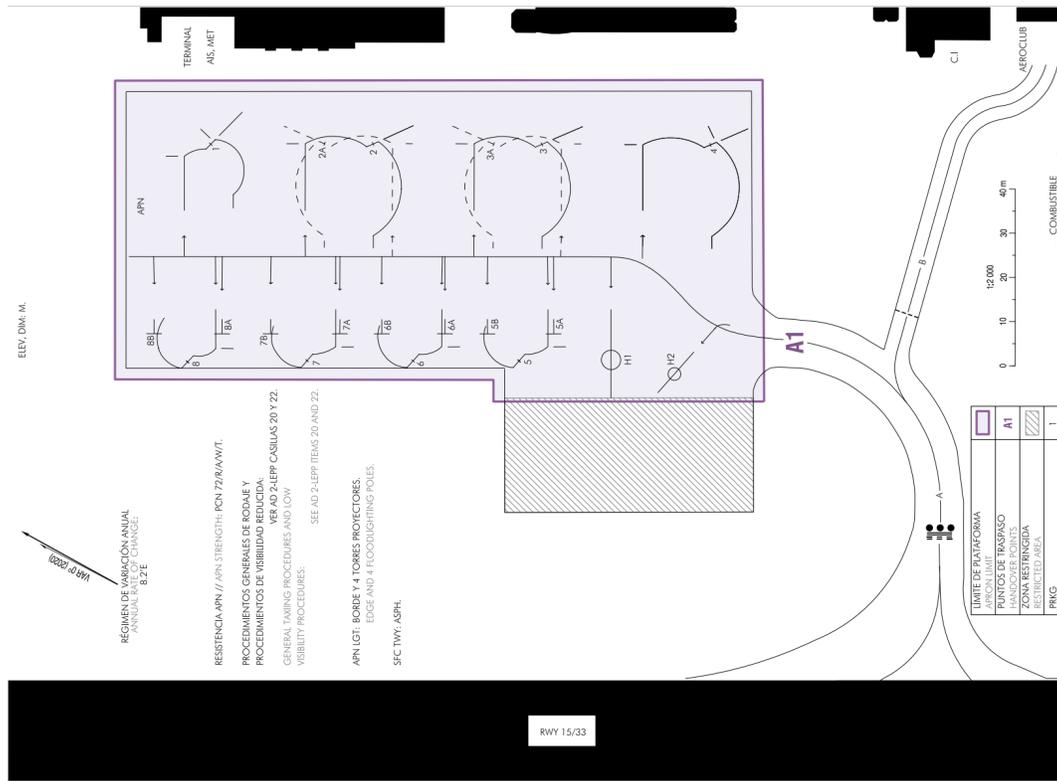


Figura 37: Plano de Estacionamiento y Atraque de Aeronaves, AIP Pamplona [47]

Con el fin de cumplir con los requisitos de visibilidad para implementar la torre de control, se hace uso del documento que detalla los obstáculos presentes en el aeropuerto y sus inmediaciones [48], recogido en la AIP. A continuación se muestra el layout tras representar las coordenadas de los obstáculos más relevantes, y su altura correspondiente, para el emplazamiento de la torre de control remota.

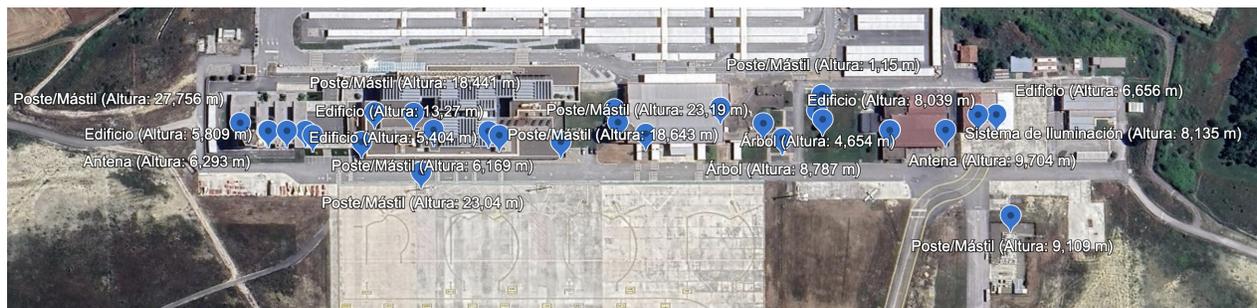


Figura 38: Obstáculos presentes en el recinto aeroportuario de Pamplona

En el caso del aeropuerto de Pamplona, existen varios claros sin edificar. Sin embargo, la existencia de árboles y mástiles de gran altura dificultan el emplazamiento de la torre de control remota en dichas zonas, motivo por el cual se decide ubicar la misma en la explanada situada a la derecha de la plataforma de atraque. En la imagen a continuación se muestra el emplazamiento de la torre convencional actual, rojo, y la ubicación propuesta para la torre de control remota, verde.



Figura 39: Emplazamiento torre convencional existente (rojo) y torre remota (verde) en el Aeropuerto de Pamplona

Por último, debido a la ubicación de la torre de control remota (360°) y su cercanía con la cabecera 33 de la pista de aterrizaje, se descarta la implementación de una torre de cámaras adicional en dicho extremo. Por consiguiente, únicamente sería necesario instalar una torre de cámaras de cobertura 180° en la cabecera 15 de la misma.

La siguiente figura muestra la ubicación de la torre de cámaras adicional que dará soporte, en caso de que fuese necesario, en las maniobras y operaciones de aterrizaje y despegue.

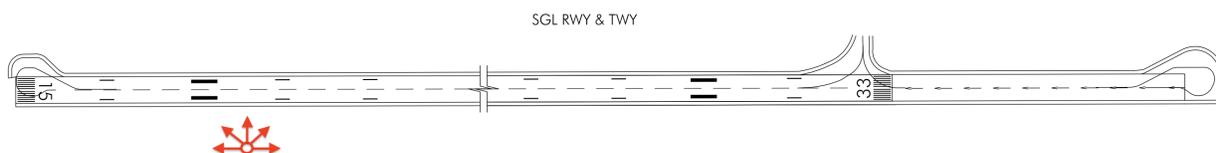


Figura 40: Ubicación cámaras en la pista 15/33 del Aeropuerto de Pamplona
[49]

3.3.5. Aeropuerto Logroño-Agoncillo

El aeropuerto de Logroño posee una única plataforma de estacionamiento y atraque de aeronaves, rodeada por la terminal de pasajeros, la torre de control convencional y la base de medios aéreos contra incendios forestales, entre otros.

A continuación se muestra una imagen que detalla el layout del aeropuerto, extraído de la AIP del mismo.

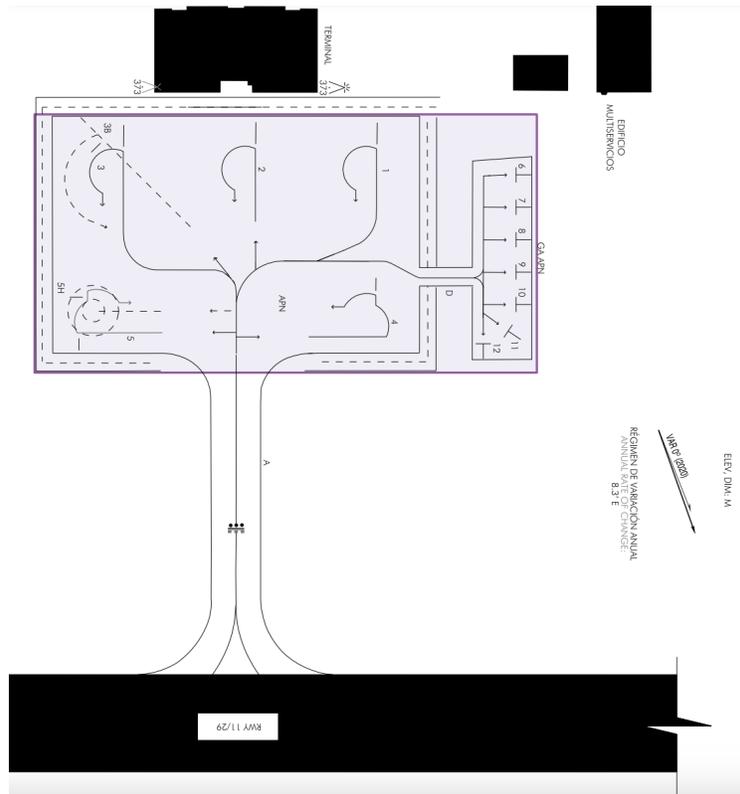


Figura 41: Plano de Estacionamiento y Atraque de Aeronaves, AIP Logroño [50]

Con el fin de cumplir con los requisitos de visibilidad para implementar la torre de control, se hace uso del documento que detalla los obstáculos presentes en el aeropuerto y sus inmediaciones [51], recogido en la AIP. A continuación se muestra el layout tras representar las coordenadas de los obstáculos más relevantes, y su altura correspondiente, para el emplazamiento de la torre de control remota.



Figura 42: Obstáculos presentes en el recinto aeroportuario de Logroño

En el caso de Logroño, al ser un pequeño aeropuerto regional, existen varios claros sin edificar. La torre convencional actual se encuentra ubicada ligeramente alejada de la terminal de pasajeros y plataforma de atraque, por lo que se considera que el emplazamiento de la torre de control remota se podría acercar a dicha zona. Teniendo en consideración los obstáculos existentes, se decide ubicar la torre de control entre la terminal de pasajeros y el edificio situado a la derecha de la plataforma.

En la imagen a continuación se muestra el emplazamiento de la torre convencional actual, rojo, y la ubicación propuesta para la torre de control remota, verde.



Figura 43: Emplazamiento torre convencional existente (rojo) y torre remota (verde) en el Aeropuerto Logroño-Agoncillo

Por último, debido a la ubicación de la torre de control remota (360°) y su cercanía con la cabecera 29 de la pista de aterrizaje, se descarta la implementación de una torre de cámaras adicional en dicho extremo. Por consiguiente, únicamente sería necesario instalar una torre de cámaras de cobertura 180° en la cabecera 11 de la misma.

La figura a continuación muestra la ubicación de la torre de cámaras adicional que dará soporte, en caso de que fuera necesario, en las maniobras y operaciones de aterrizaje y despegue.

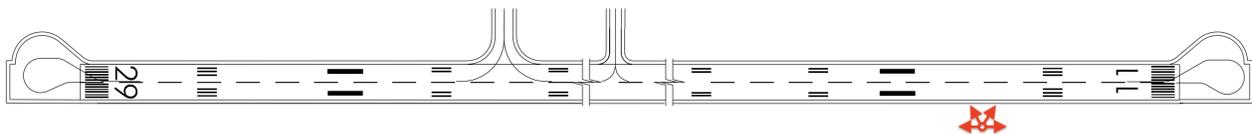


Figura 44: Ubicación cámaras en la pista 11/29 del Aeropuerto Logroño-Agoncillo
[52]

3.4. Propuesta Centro de Control

Tras conocer la disposición de las nuevas torres de control en los cuatro aeropuertos tratados, es necesario conocer la ubicación del centro de control, desde donde se proporcionarán los servicios ATS, al igual que la tecnología a implementar para poder llevar a cabo el proyecto.

Con el fin de conocer los elementos principales que componen el centro de control remoto, se vuelve a hacer referencia a la arquitectura del sistema de control remoto, mostrada anteriormente.

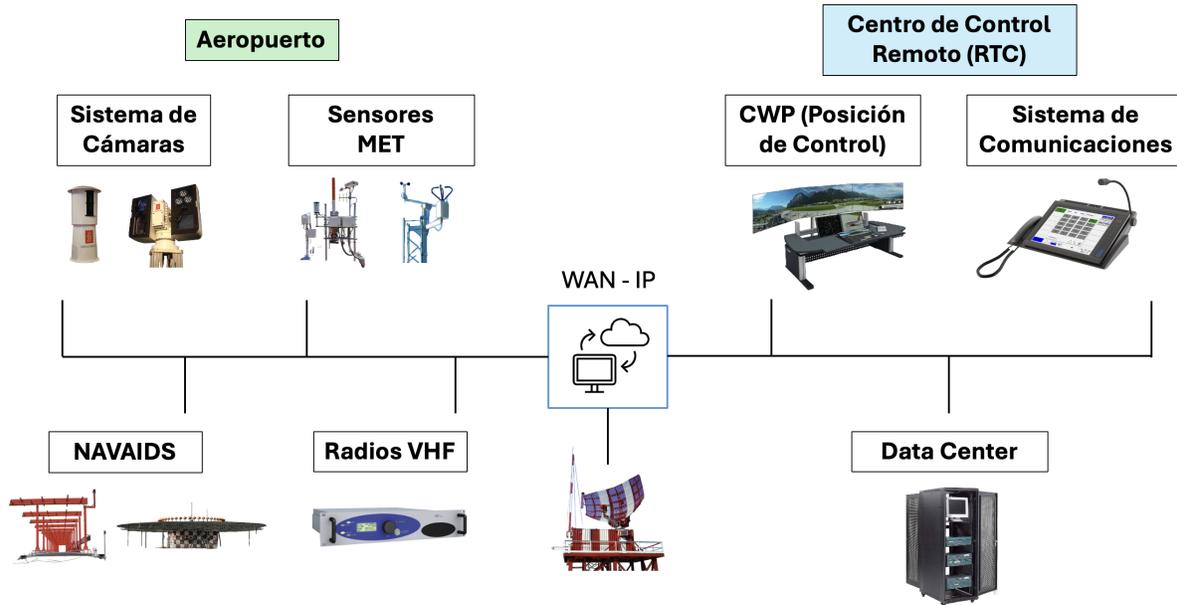


Figura 45: Arquitectura Sistema de Control Remoto

En este caso, al ser el centro de control remoto un edificio completamente nuevo a tratar, los tres elementos que lo componen serán necesarios de implementar.

3.4.1. Tecnología a Implementar

A continuación se resumen los elementos principales que deberán estar implementados en el centro de control remoto.

■ Posición de Control

Representa cada una de las posiciones desde donde el ATCO provee los servicios ATS a los diferentes aeropuertos seleccionados. Como ha sido mencionado en el inicio del documento, la posición de control está compuesta, a su vez, por los siguientes elementos:

- **Visualización de Vídeo.** Composición de monitores que conforman el 'display' que muestran las imágenes de los vídeos captados por los sistemas de cámaras implementados en los aeropuertos. Al ser estas captadas por un módulo de cámaras 360º, los monitores deben poseer y estar colocados con cierta curvatura, con el fin de lograr una proyección cilíndrica y evitar deformaciones o discontinuidades en las vistas.

El número de monitores que componen el display de cada CWP variará en función del número de cámaras implementadas en los aeropuertos y el tráfico aéreo de los mismos. Dicho esto, se contempla un rango de entre seis y diez unidades.

Al final de esta sección se reflejará en una tabla un resumen de los componentes necesarios a implementar en cada posición de control de cada aeropuerto.

- **Visualización de Información Meteorológica y NAVAID.** Sobre la mesa principal de la CWP se encuentra un primer monitor donde se refleja la información meteorológica del aeropuerto, información del estado de las ayudas a la navegación (NAVAIDS), o el cambio de dirección de la pista activa, entre otros.
- **Visualización de Radares e Información de Vigilancia.** Un segundo monitor está destinado a la representación de los datos e información procedentes de los radares secundarios, reflejando las etiquetas de las aeronaves y datos de posicionamiento de las mismas.
- **Visualización de Plataforma PTP.** Por último, un tercer monitor se reserva para la visualización de las imágenes procedentes de la plataforma PTP, o Pan-Tilt-Zoom, que recoge la funcionalidad binocular, entre otras.
- **Interfaz de Control.** Interfaz que permite controlar todas las funcionalidades e información reflejada en los monitores de los cuatro elementos recién mencionados. Está compuesto por un monitor y diversos periféricos, como un ratón y un teclado.

A continuación se muestra cómo queda representada la posición de control con todos los elementos que la componen.

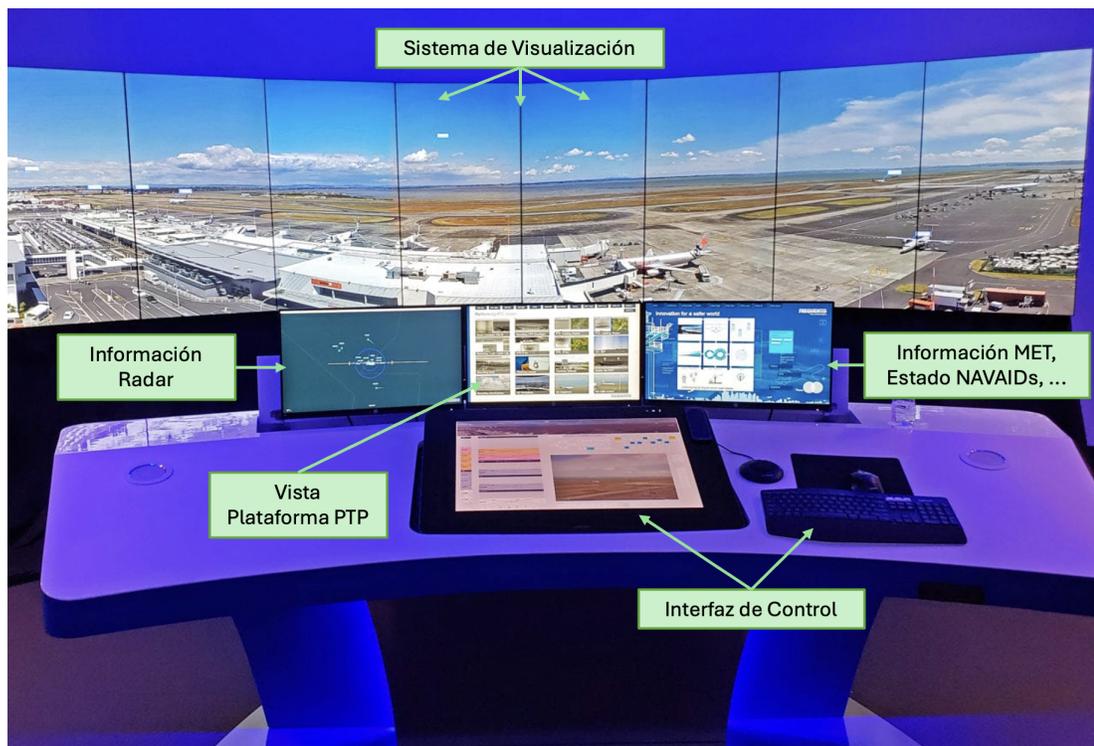


Figura 46: Tecnología Posición de Control, CWP

■ Sistema de Comunicaciones

El segundo elemento que compone el centro de control remoto es el sistema de comunicaciones, que permite tanto el contacto entre el RTC y las aeronaves, tierra-aire (A/G), como el contacto entre el RTC y el personal aeroportuario, tierra-tierra (G/G). Ambas se establecen a través de bandas VHF, variando la frecuencia de los canales de radio en función del destinatario, y es controlado utilizando el panel VCCS, *Voice Communication Control System*, situado sobre la mesa de la posición de control.



Figura 47: Ubicación Panel VCCS en la CWP
[53]

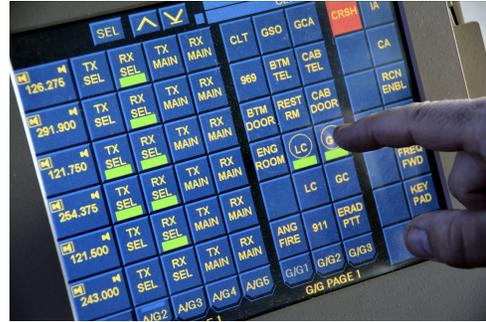


Figura 48: Detalle del Panel VCCS
[54]

Tal y como se muestra en la Figura 47, el panel VCCS se sitúa al lado del interfaz de control de la posición de control. Desde dicho sistema, el ATCO es capaz de seleccionar el tipo de comunicación que desee establecer, (A/G) o (G/G), y la frecuencia del canal de radio, como se muestra en la Figura 48.

Asimismo, se debe habilitar en la red del centro de control remoto un sistema de comunicaciones de emergencia o contingencia para evitar incomunicaciones en caso de pérdida de suministro.

■ Data Center

El centro de datos alimenta las posiciones de control del RTC con la información procedente de los sistemas implementados en el aeropuerto y que son transferidos a través de la WAN. En otras palabras, proporciona la infraestructura tecnológica necesaria para gestionar los datos voz, de vídeo y sensores de los diferentes aeropuertos.

El número de racks de servidores que lo componen dependen del número de aeropuertos a controlar, estimando un total de cuatro racks para este caso de estudio en particular.

Una vez analizados los elementos que componen el centro de control remoto, se debe determinar el número de CWP que van a conformar el mismo. Para ello, es de importancia conocer las diferentes responsabilidades y roles dentro de una torre de control convencional.

A nivel general, las áreas de trabajo de un ATCO pueden clasificarse en Centros de Control de Área (**ACC**), Oficina de Control de Aproximación (**APP**) y Torre de Control (**TWR**). El primero es responsable del control en ruta de las aeronaves, el segundo es responsable de proveer servicios ATS al tráfico que despegue y aterrice dentro del TMA, y el control de torre será estudiado con más detalle a continuación.

Cabe destacar que en varios casos, incluyendo aquellos aeropuertos con menor densidad de tráfico, se prescindiría del controlador de Aproximación (APP) ya que sus actividades pueden ser realizadas por los controladores de Torre (TWR). En dichos casos, los vuelos son transferidos desde la torre de control al centro de control de área más próximo.

Dentro de una torre de control convencional, se encuentran cuatro tipos de controladores aéreos [55] [56]:

- **Local.** También conocido como 'Controlador de Torre' y considerada la posición de control principal dentro de la misma. Es responsable de proveer servicios ATS en las áreas de maniobras, como son las pistas de aterrizaje e intersecciones, al igual que en el espacio aéreo en las proximidades del aeropuerto.
- **Ground.** Su área de responsabilidad recoge aquellas zonas en tierra que no son operadas por el controlador local, como son las plataformas de estacionamiento y las calles de rodaje.
- **Delivery/Clearance.** Comúnmente conocido como 'Controlador de Autorizaciones', responsable de procesar información de vuelo, información meteorológica y, como su propio nombre indica, responsable de emitir autorizaciones de movimiento de aeronaves dentro del espacio aéreo controlado.

- **Supervisor.** También conocido como 'Coordinador', asiste a los controladores locales y ground en la ejecución de las actividades a realizar y supervisa que estas se desempeñen sin complicaciones y de manera segura.

A día de hoy, dependiendo de la densidad de tráfico aéreo a controlar, es común fusionar y separar las posiciones de control recién mencionadas. Para este caso de estudio, al considerarse aeropuertos regionales con una demanda relativamente baja, las actividades del controlador local, ground y clearance de cada aeropuerto serán asumidas por un único ATCO.

Asimismo, teniendo en consideración que el tráfico en Logroño-Agoncillo es de cuatro vuelos diarios (de media), se considera viable y óptimo que la gestión del tráfico aéreo se realice desde la posición de control de otro aeropuerto, como puede ser el de Pamplona. Por consiguiente, en el Centro de Control se habilitan **tres** CWPs: una posición para el aeropuerto de Vitoria, otra para el de San Sebastián y otra para los aeropuertos de Pamplona y Logroño.

Adicionalmente, se habilita una posición de control adicional de supervisión, que desempeñará las funciones propias de dicho rol mencionadas anteriormente: coordinar y verificar las actividades de provisión de servicios ATS, al igual que monitorizar los sistemas que componen el sistema de control remoto, garantizando el correcto funcionamiento de los mismos y alertando en caso de fallo.

Se recoge a continuación la estimación de los elementos, y el número de los mismos, necesarios de implementar para la propuesta de RTC, al igual que la disposición del mismo.

Cuadro 13: Número de componentes a implementar en el RTC, por aeropuerto

Elemento	LEVT	LESO	LEPP/LERJ
Monitores Sistema Visualización	8	10	8
Monitores MET y NAVAID	1	1	1
Monitores Radar	1	1	1
Monitores Display PTP	1	1	1
Monitores Interfaz de Control	1	1	1
Periféricos	1	1	1
Panel VCCS	1	1	1
Racks (Servidores)	1	1	2

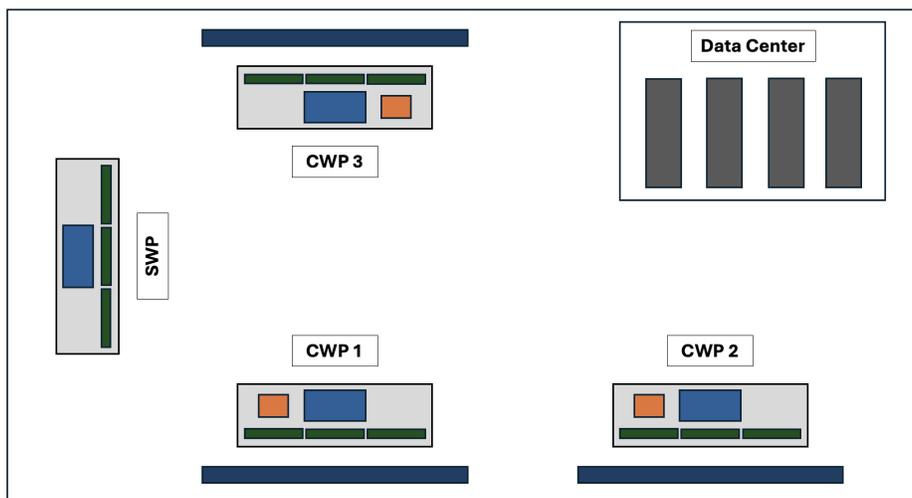


Figura 49: Disposición de la propuesta de RTC

3.4.2. Ubicación Centro de Control

La ubicación del centro de control remoto se encuentra influenciada y restringida por las capacidades y el rendimiento de la red WAN, que interconecta todos los elementos del sistema. Esta debe satisfacer unos requisitos de alto nivel en términos de Calidad de Servicio, QoS, como son el ancho de banda o la latencia. Por este motivo, es de vital importancia que el RTC se encuentre situado próximo a un nodo de red, definido como un punto de conexión y unión entre redes y/o dispositivos que actúa como una interfaz, permitiendo la comunicación y el intercambio de datos entre los mismos [57].

Los nodos de red suelen estar presentes en centros de investigación y universidades del país, entre otros establecimientos. Con el fin de seleccionar el nodo más próximo al área que engloba los cuatro aeropuertos de estudio, se hace uso de la *Red Española de Supercomputación* y los catorce nodos que conforman la misma. Dichos nodos ofrecen servicios de cómputo y explotación de datos, permitiendo la transmisión de grandes cantidades de los mismos. En la Figura 50 se muestra la ubicación de cada uno de los nodos que conforman la RES.



Figura 50: Nodos de la Red Española de Supercomputación [58]

De los nodos mostrados, los más cercanos a los aeropuertos de estudio son el que se encuentra situado en la Universidad de Zaragoza (UZ) y NASERTIC, en Pamplona. Por motivos de cercanía, se selecciona este último, ubicando por tanto el centro de control remoto en la propia ciudad navarra. La estimación de la localización del RTC se realiza sin tener en consideración factores económicos ni características del terreno y recinto urbanístico, por falta de información. Se toma como referencia el laboratorio de NASERTIC (en rojo) y se aproxima un posible recinto donde podría ser implementado cercano al mismo (verde), en las afueras de la ciudad.

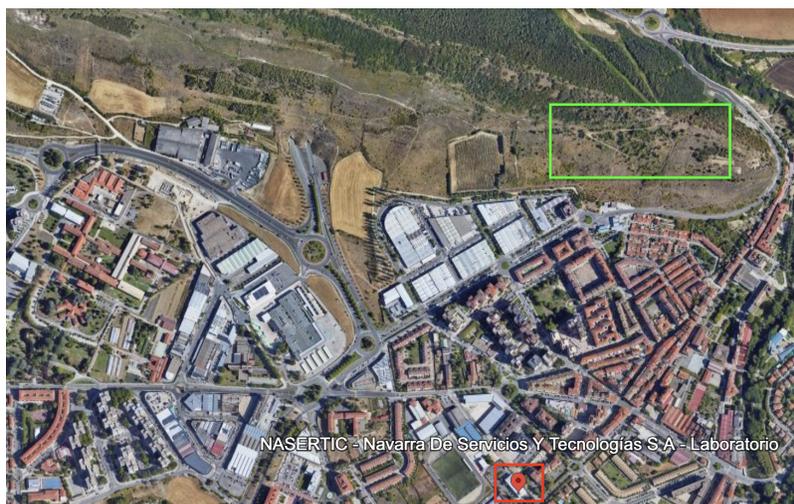


Figura 51: Ubicación (estimada) del RTC

3.5. Mantenimiento

El mantenimiento tiene como objetivo garantizar el correcto funcionamiento de los equipos y elementos que conforman el sistema de control remoto, asegurando así una provisión de servicios ATS continua, segura y eficiente.

Debido a la criticidad de los elementos que componen el sistema RTS, resulta crucial elaborar un plan de mantenimiento que especifique las actividades a realizar y la frecuencia de las mismas. Para ello, se distinguen en primer lugar los diferentes tipos de mantenimiento que pueden llevarse a cabo:

- **Mantenimiento Preventivo.** Tiene como objetivo principal prevenir averías y fallos en el sistema controlando el deterioro del mismo. Para ello, se realizan de manera periódica inspecciones planificadas, reparaciones y sustituciones de piezas.
- **Mantenimiento Correctivo.** Conjunto de acciones u órdenes de trabajo llevadas a cabo con el fin de restituir un equipo defectuoso a un estado de funcionamiento óptimo.
- **Mantenimiento Perfectivo.** Está destinado a los componentes software y tiene como objetivo mejorar el rendimiento y eficiencia de un sistema a través de la optimización del mismo o implementación de nuevas funcionalidades.
- **Mantenimiento Adaptativo.** Al igual que en el caso anterior, el mantenimiento adaptativo también está destinado a los elementos software y se define como las actividades a realizar con el fin de adaptar el software de un equipo a los cambios que pueda sufrir el entorno en el que opera. Teniendo en consideración el rápido avance tecnológico, este mantenimiento se considera imprescindible para evitar que los sistemas se queden obsoletos y alargar así su vida útil.

Por consiguiente, partiendo de los tipos de mantenimiento a realizar, se distinguen dos actividades principales:

- **Mantenimiento de Hardware.** Actividades a realizar sobre los equipos físicos que componen el sistema RTS, tanto los que se encuentran implementados en el aeropuerto (cámaras, sensores, estructura de la torre, etc) como los que conforman el centro de control remoto (pantallas, panel VCCS, racks, etc).
- **Mantenimiento de Software.** Actividades a realizar sobre los equipos software del sistema RTS, como las funcionalidades implementadas en los sistemas de cámaras (seguimiento de objetos, binocular, etc) y las bases de datos.

Por último, se plantean los siguientes ciclos de mantenimiento para las actividades recién mencionadas:

- **Semanal.** Revisión semanal de los equipos hardware implementados en el aeropuerto con el fin de verificar el estado de los mismos y realizar tareas de limpieza o acciones correctivas, en caso de ser necesario.
- **Mensual.** Revisión mensual de los equipos hardware implementados en el centro de control remoto con el fin de verificar el estado de los mismos.
- **Trimestral.** Verificación y actualización, en caso de ser necesaria, de las bases de datos del sistema.
- **Semestral.** Revisión del sistema RTS completo, tanto componentes hardware como software, más allá de una inspección visual. Es decir, realizar verificaciones y ensayos de los sistemas, calibraciones de los mismos, etc.

3.6. Análisis Económico

A día de hoy, la aviación se encuentra en constante evolución e impulsada por los avances tecnológicos, buscando la implementación de estos con el fin de lograr mejoras en términos de eficiencia, rentabilidad y seguridad operacional. El concepto de proveer servicios ATS con carácter remoto nace teniendo dichos pilares en mente.

Se han tratado en secciones anteriores los términos de eficiencia, centralizando los recursos y habilitándolos únicamente cuando sean necesarios, y seguridad operacional, mejoras en la identificación y gestión del tráfico aéreo presentadas por las nuevas tecnologías a implementar. Por consiguiente, el tercer y último pilar a tratar es el aspecto económico, detallado en esta sección.

En primer lugar, es necesario conocer cuáles son las fuentes de ingresos principales de los aeropuertos. Para ello, se definen dos categorías:

- **Ingresos Aeronáuticos.** Derivados del uso que hacen los operadores de aeronaves sobre el aeropuerto. Incluyen tasas de aterrizaje, tarifa de salida de pasajeros, tarifa de estacionamiento de aeronaves y suministro de combustible, entre otros.
- **Ingresos No Aeronáuticos.** Comúnmente conocidos como 'ingresos comerciales' por la naturaleza de los mismos, debido a que engloban todas las actividades de comercio desarrolladas en el aeropuerto, como pueden ser el aparcamiento, alquiler de coches, restauración, arrendamiento, publicidad, etc.

En términos generales, los ingresos aeronáuticos suelen suponer entre el 50 % y el 60 % de las ganancias de un aeropuerto, tal y como se muestra en la siguiente figura, que representa los porcentajes de los ingresos de la red aeroportuaria española en el año 2023.

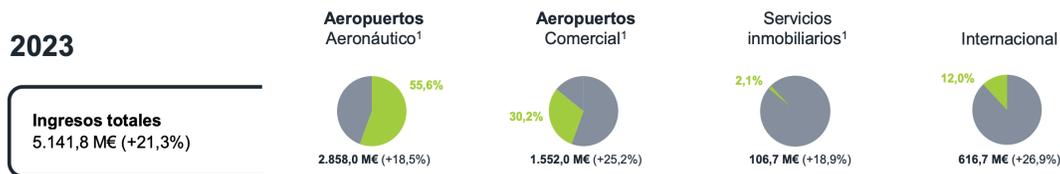


Figura 52: Fuentes de ingresos aeroportuarios por línea de actividad, 2023
[59]

Por otro lado, es necesario conocer cuáles son los costes principales que debe afrontar un aeropuerto. Para ello, es posible hacer referencia nuevamente a las dos categorías mencionadas anteriormente y dividir los gastos en:

- **Costes Aeronáuticos.** Derivados de la operación del propio aeropuerto, como aprovisionamientos, personal, gastos de explotación (mantenimiento, seguridad, energía, tributos, ...) y amortizaciones, entre otros.
- **Costes No Aeronáuticos.** Asociados a los gastos e impuestos sobre las ventas de las tiendas explotadas por el aeropuerto.

Al igual que con los ingresos, los costes aeronáuticos componen más del 70 % de los gastos totales de un aeropuerto.

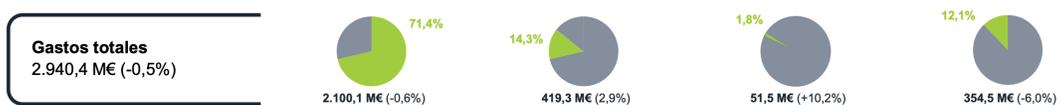


Figura 53: Costes aeroportuarios por línea de actividad, 2023
[59]

Es importante tener en consideración que muchos de los costes operativos o aeronáuticos son fijos e independientes del número de pasajeros u operaciones aéreas que trafique el aeropuerto. Por consiguiente, en aquellos perfiles aeroportuarios con menor densidad de tráfico aéreo, como es el caso de los cuatro aeropuertos seleccionados, y donde los ingresos procedentes de las tasas del mismo pueden no llegar a cubrir los gastos totales, generar beneficios se considera todo un reto.

Por este motivo, la implementación de un sistema de control remoto sobre aeropuertos pequeños o medianos, con menor densidad de tráfico aéreo, puede disminuir los costes no aeronáuticos, manteniendo intactos los ingresos totales, y rentabilizando así la actividad aeroportuaria.

Con el fin de realizar este análisis económico, se van a diferenciar las inversiones y los costes operativos de una torre convencional y una torre remota. Cabe mencionar que debido a la complejidad de realizar un análisis cuantitativo, por los múltiples factores que intervienen en cada caso, el estudio se centrará en realizar un análisis cualitativo.

3.6.1. Inversión

Con el fin de abarcar este primer aspecto del análisis económico, se hará referencia a los costes de infraestructura y de tecnología de ambos casos.

■ Torre de Control Convencional

En el caso de una torre convencional, el factor que contribuye mayoritariamente a los costes de la construcción de la misma es la altura, siendo esta proporcional a la inversión necesaria para su implementación. Tal y como detalla FAA, el coste de construcción es de cuarenta mil dólares por pie de altura (\$40 000/ft) [60]. Asimismo, el diseño de la torre debe tener en consideración la ergonomía de la misma, con el fin de garantizar un ambiente de trabajo óptimo para los ATCOs.

Por otro lado, en caso de que surja la necesidad de construir una torre adicional, por expansión del recinto aeroportuario, se deberá invertir el capital correspondiente teniendo en consideración los desafíos que puede suponer buscar un emplazamiento adecuado para toda la infraestructura que englobe la nueva torre convencional, y el impacto que dichas dificultades pueda tener sobre el coste de construcción de la misma.

Por último, la inversión tecnológica de una torre de control convencional, en comparación con una remota, es considerablemente más pequeña, centrándose en los sistemas básicos de provisión de servicios ATS, como son el sistema de comunicaciones, monitores para la visualización de información radar y MET, y periféricos.

■ Torre de Control Remota

En el caso de una torre remota, el coste de la infraestructura debe englobar no sólo la propia torre de control, sino también el emplazamiento del centro de control remoto, desde donde se dará servicio a los diferentes aeropuertos.

A diferencia de la convencional, el diseño de la estructura de la torre remota es considerablemente más sencilla, debido a que no está pensada para ser un centro de trabajo físico de personas ni debe estar acomodada ergonómicamente con dicho fin. Por consiguiente, al tratarse de una torre simple con una plataforma donde reside el sistema visual de vigilancia, el coste de construcción e implementación se ve drásticamente reducido.

En cuanto al centro de control remoto se refiere, a pesar de que sería necesario invertir capital en el edificio físico que albergue todas las posiciones de control, dicho gasto será un porcentaje más pequeño en comparación por el hecho de ser una nave estándar.

Por último, como cabe esperar, la inversión a realizar en términos de componentes y sistemas tecnológicos, tanto en los aeropuertos como en el centro de control, es notable. A pesar de ello, en términos generales, sigue resultando más económica la opción remota que la convencional.

Con el fin de aportar magnitud a esta primera sección se realiza una comparativa a gran escala, sin entrar individualmente en los detalles de cada elemento, de la inversión realizada sobre las torres convencionales de diversos aeropuertos regionales españoles y los proyectos activos de torre de control remota en el país.

Cuadro 14: Inversión proyectos torres de control

Elemento	Inversión (millones €)
Aeropuerto de Pamplona	8,60 [61]
Aeropuerto Logroño-Agoncillo	2,93 (Sólo Obra Civil) [62]
Aeropuerto de Castellón	4,53 [63]
Aeropuerto de Fuerteventura	5,32 [64]
Aeropuerto de Menorca (RTS)	4,8 [65]
Aeropuerto de Vigo (RTS)	5,1 [65]

Nota: Cabe resaltar que la inversión en ambos proyectos remotos, Menorca y Vigo, incluye tanto la infraestructura y sistemas de la torre remota como las del centro de control remoto, al igual que la formación, validación y puesta en servicio del sistema completo. En el caso de las torres convencionales mostradas, únicamente se trata el coste de la obra civil de las mismas y la implementación de los sistemas requeridos.

Asimismo, teniendo en consideración que el propio edificio que compone el RTC y su emplazamiento suponen alrededor del 60 % del importe total del sistema remoto, centralizar la gestión de varios aeropuertos desde un único centro de control permite reducir dicho coste, reduciendo así la inversión necesaria para llevar a cabo el proyecto.

3.6.2. Costes Operativos

Los costes operativos de la torre de control se pueden resumir, mayoritariamente, en los costes asociados al mantenimiento o actividades necesarias para prolongar el ciclo de vida de la torre y el salario de los ATCOs.

■ Torre de Control Convencional

En el caso de una torre convencional, además de los trabajos de mantenimiento a realizar sobre la estructura física de la misma, se deben considerar aquellos equipos y elementos relacionados con el confort de los ATCOs, como son el ascensor y el sistema de aire acondicionado y calefacción, entre otros. Por este motivo, el coste asociado a las actividades de mantenimiento variará en función del elemento a inspeccionar y acción a realizar.

Por otro lado, en cuanto al número de controladores operando las cuatro torres en este caso de estudio, al ser aeropuertos de menor densidad de tráfico aéreo no son operados con carácter normal por diez controladores, como es el caso de Adolfo-Suárez Barajas. Sin embargo, partiendo del hecho de que en una torre de control no puede permanecer una persona a solas y que existen diversos roles y responsabilidades a desempeñar, detallados en la sección anterior, se estiman entre dos y tres controladores operando cada una de las torres.

Adicionalmente, se deben tener en consideración los períodos de descanso de cada equipo ATCO. De manera general, la duración de una jornada diurna se fija en diez o doce horas, en función de la carga de trabajo, y la jornada nocturna no debe sobrepasar las ocho horas de trabajo. Asimismo, el descanso entre turnos debe ser de un mínimo de doce horas y el total de horas trabajadas a la semana no puede superar las cincuenta [66]. Por consiguiente, es necesario formar diversos equipos con el fin de cumplir los períodos de rotación sin que la provisión de servicios se vea afectada [67].

Con el fin de estimar el número de controladores en cada aeropuerto, se separa el día en tres turnos: mañana, tarde y noche. Teniendo en consideración que el único de los cuatro aeropuertos seleccionados que opera por la noche (H24) es el de Vitoria, se prescinden de ATCO de turno de noche en el resto de aeropuertos.

Atendiendo a las horas de jornada laboral reglamentarias, y respetando los descansos de los controladores, en los tres aeropuertos que no ofrecen operación nocturna se podrían formar un total de tres equipos, rotando de la siguiente manera:

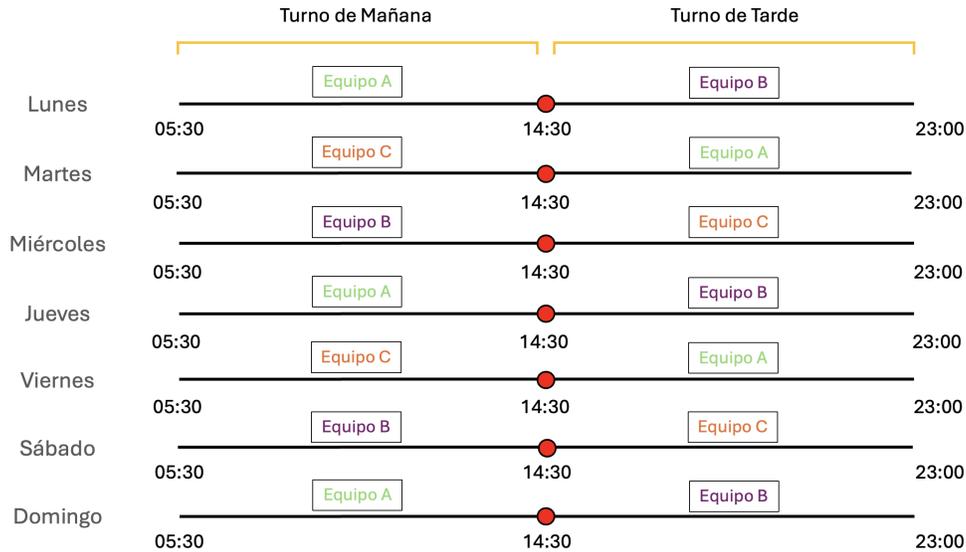


Figura 54: Schedule ATCO para los aeropuertos de San Sebastián, Pamplona y Logroño

En el caso del aeropuerto de Vitoria, al operar en horario nocturno, se reorganizan los turnos y se estima, atendiendo a las horas de jornada laboral reglamentarias y los descansos de los controladores, cuatro equipos:



Figura 55: Schedule ATCO para el aeropuerto de Vitoria

Teniendo en consideración la estimación realizada anteriormente con respecto al número de controladores activos por torre y tomando como referencia que el salario medio de un controlador aéreo en España es de **cient mil euros** al año [68], se representa en la siguiente tabla una aproximación de los costes en los salarios ATCO por aeropuerto.

Cuadro 15: Estimación costes de salarios ATCO por aeropuerto (Torre Convencional)

Elemento	LEVT	LESO	LEPP	LERJ
Número de equipos ATCO	4	3	3	3
Número de controladores por equipo	3	3	3	3
Número total de controladores	12	9	9	9
Coste Total	1,2 millones (€)	900 mil (€)	900 mil (€)	900 mil (€)

Por consiguiente, se estiman que los costes asociados a los salarios de los controladores aéreos que operan los cuatro aeropuertos seleccionados son de **3,9 millones de euros** anuales.

■ Torre de Control Remota

En el caso de una torre remota, el programa de mantenimiento debe ser más meticuloso y frecuente por la criticidad de los componentes, como ha sido detallado en el punto anterior. A pesar de ello, al ser un sistema más sencillo a nivel estructural, los costes de mantener el mismo se verán reducidos. Lo mismo es aplicable para el centro de control remoto, al ser un edificio estándar, el mantenimiento de los sistemas SW y HW, al igual que aquellos destinados al confort de los ATCO, será menor que en el caso de una torre de control convencional.

Por otro lado, los costes asociados a los salarios de los controladores también se verán reducidos, debido a que se centralizan los recursos en una misma sala de control, haciendo posible la disminución de ATCOs necesarios para cada CWP.

Como ha sido mencionado en la sección anterior, se estiman un total de tres posiciones de control, cada una operada por un controlador aéreo, y una SWP, o posición de supervisión, operada por un ATCO adicional. Con esta configuración, se reduce el número total de controladores activos por torre individual de dos/tres (torre convencional) a uno (torre remota).

Bien es cierto que, al igual que en la torre convencional, sería necesario formar equipos para las rotaciones entre jornadas y períodos de descanso de los equipos ATCO. En el caso de la torre de control remota, se mantienen los mismos horarios y *schedules* de rotación mostrados en el caso convencional, tratando cada CWP como aeropuerto individual. La estimación de los costes, por consiguiente, se resume a continuación.

Cuadro 16: Estimación costes de salarios ATCO por aeropuerto (Torre Remota)

Elemento	CWP LEVT	CWP LESO	CWP LEPP/LERJ	SWP
Número de equipos ATCO	4	3	3	4
Número de controladores por equipo	1	1	1	1
Número total de controladores	4	3	3	4
Coste Total	400 mil (€)	300 mil (€)	300 mil (€)	400 mil (€)

Por consiguiente, se estiman que los costes asociados a los salarios de los controladores aéreos en el caso de la implementación de una solución remota serían de **1,4 millones de euros** anuales.

3.6.3. Conclusiones Análisis Económico

En el caso de aeropuertos regionales con menor densidad de tráfico aéreo, como son los cuatro seleccionados para este caso de estudio, la inversión **individual** para la implementación de la torre remota y el centro de control remoto varía relativamente poco en comparación con una torre de control convencional, tal y como se aprecia en la Tabla 14. No obstante, al ser gestionados desde un mismo centro de control remoto, deja de ser necesario el emplazamiento de cuatro RTCs individuales y la inversión se resume en la infraestructura y tecnología de las cuatro torres de control remotas, y sistemas asociados, implementados en los cuatro aeropuertos, y un único centro de control remoto, adaptado a la provisión de servicios a dichos aeropuertos.

Realizando estimaciones a gran escala, tomando como referencia los datos de aeropuertos y proyectos actuales, donde la implementación de la torre de control remota tiene un coste de entre 1,2 - 1,5 millones de euros [69] y la construcción del centro de control remoto asciende a 2,0 - 3,5 millones de euros, se podría estimar que la inversión necesaria para llevar a cabo el proyecto rondaría los **9,5 millones de euros**.

Comparando dicha cifra con la construcción de una torre de control convencional de un aeropuerto regional, cuyo coste individual oscila entre los 4,5 y 9,0 millones de euros, se concluye que la reducción en la inversión necesaria para implementar un sistema de control remoto capaz de gestionar cuatro aeropuertos simultáneamente desde un único RTC sería de entre un **47,2 %** y un **73,6 %**.

Por otro lado, en cuanto a los costes operativos se refiere, resulta complejo realizar una estimación del ahorro en los costes de mantenimiento debido a que depende de múltiples factores como son la infraestructura de la torre, el tipo de actividad de mantenimiento a realizar y sobre qué componente se realiza dicha acción.

Sin embargo, a grandes rasgos, el mantenimiento de los elementos tecnológicos y la estructura que componen la propia torre de control remota será más económico por la simpleza del sistema y su accesibilidad, en comparación con una convencional. En cuanto al centro de control, la mantenibilidad de un edificio estándar y los sistemas implementados en el mismo, en comparación con una torre de entre veinte y treinta metros de altura, es más simple. Por consiguiente, aunque no se realicen estimaciones del ahorro, se prevé que los costes asociados a las actividades de mantenimiento sean inferiores.

Por último, en cuanto a los salarios de los ATCO se refiere, implementar la solución de sistema de control remoto en los cuatro aeropuertos seleccionados supondría un ahorro del **64,10 %** en los costes operativos, en base a las estimaciones realizadas en los puntos anteriores.

(*) **Nota:** Se resalta nuevamente que las estimaciones realizadas son de carácter orientativo, no son producto de un análisis exhaustivo de cada caso ni deben tratarse como tal. Existen diversos factores, cambiantes para cada aeropuerto, que junto con la escasez de información relativa a este nuevo concepto complican la posibilidad de realizar un análisis más detallado del aspecto económico del mismo.

3.7. Análisis de Riesgos

El propósito de esta sección es recopilar y describir, a gran escala, los posibles riesgos asociados a la implementación de las torres de control remotas y la provisión de servicios ATS desde un único centro de control remoto [70] [71].

La tabla detalla, por los componentes principales que componen el sistema, una breve descripción del riesgo, la causa, el impacto del mismo, la severidad y el plan de mitigación para reducir su impacto sobre el sistema.

Cuadro 17: Análisis de Riesgos

Elemento	Descripción	Causa	Impacto	Severidad	Mitigación
Sistema Visual de Vigilancia (Módulo 360º)	Pérdida parcial o total de la capacidad de observar e identificar objetos y el espacio aéreo dentro de la zona de responsabilidad.	Fallo del sistema (equipos HW), error de instalación, error de configuración.	Pérdida parcial o total de contacto visual, degradación en la provisión de servicios ATS.	Alta	Utilizar los demás sistemas visuales, plataforma PTP y módulo de cámaras 180º, como medidas de contingencia y recuperar las imágenes perdidas. Asimismo, aplicar el plan de mantenimiento preventivo.
Sistema Visual de Vigilancia (Módulo 180º)	Pérdida parcial o total de la capacidad de observar e identificar objetos y el espacio aéreo dentro de la zona de responsabilidad.	Fallo del sistema (equipos HW), error de instalación, error de configuración.	Pérdida parcial o total de contacto visual, degradación en la provisión de servicios ATS.	Alta	Utilizar los demás sistemas visuales, plataforma PTP y módulo de cámaras 360º, como medidas de contingencia y recuperar las imágenes perdidas. Asimismo, aplicar el plan de mantenimiento preventivo.
Sistema Visual de Vigilancia	Información visual presentada no es en tiempo real, existe un desfase entre la realidad y la imagen recibida en uno o varios monitores.	Fallo del sistema (equipos HW), error de instalación, error de configuración.	Degradación en la provisión de servicios ATS.	Alta	Monitorizar de manera continua el rendimiento de la red y ajustar los parámetros técnicos acorde al mismo.

Cuadro 17: Análisis de Riesgos

Elemento	Descripción	Causa	Impacto	Severidad	Mitigación
Posición de Control (CWP)	Pérdida parcial o total de la capacidad de operar la posición de control del RTC.	Fallo del sistema (equipos HW), error de instalación, error de configuración.	Incapacidad de proveer servicios ATS en el área de responsabilidad operada por la CWP.	Alta	Transferir el control del aeropuerto afectado a otra CWP y gestionar ambos simultáneamente.
Sistema de Comunicaciones	Pérdida parcial o total del sistema de comunicaciones.	Fallo del sistema (equipos HW), error de instalación, error de configuración.	Pérdida parcial o total en las comunicaciones con el personal del aeropuerto o las aeronaves del área de responsabilidad.	Alta	Utilizar el sistema de comunicaciones de emergencia o contingencia habilitado en la red. En el caso de pérdida de comunicación con las aeronaves, hacer uso de la lámpara de señales.
Ciberseguridad	Pérdida parcial o total del sistema por ciberataques, que pueden comprometer la operación segura del mismo.	Vulnerabilidades en el sistema por falta de, o fallos, en la protección del mismo.	Degradación del sistema, cuya integridad y disponibilidad se ven afectadas.	Alta	Implementar medidas de ciberseguridad, como protocolos robustos de seguridad, firewalls y formación del personal ATCO.
Pérdida de Energía	Pérdida total del suministro de energía al centro de control remoto.	Interrupciones y cortes en el suministro.	Pérdida total de la capacidad de proveer servicios ATS al aeropuerto.	Alta	Instalar sistemas de energía de contingencia, como generadores, capaces de alimentar el RTC en casos de emergencia.

Cuadro 17: Análisis de Riesgos

Elemento	Descripción	Causa	Impacto	Severidad	Mitigación
Interfaz Humano-Máquina (HMI)	Confusión por parte del personal ATCO al operar el sistema y ofrecer servicios ATS.	Falta de interacción con el nuevo sistema, la tecnología implementada y sus funcionalidades.	Pérdida parcial o total de la provisión de servicios ATS en el área de responsabilidad.	Alta	Proporcionar formación al personal ATCO de manera continua, con la ayuda de simulaciones y ensayos de los procesos a seguir, incluyendo los casos de emergencia.
Factor Humano	Fatiga visual y estrés.	Intervalos de tiempo prolongados frente a las pantallas que conforman el sistema de visualización y otros displays.	Menor consciencia situacional, mayor tiempo de reacción y dificultad en la toma de decisiones.	Alta	Diseñar posiciones de control ergonómicas. Asimismo, respetar los períodos de descanso y schedule de rotación entre equipos ATCO.

Los riesgos recién mencionados son considerados los más críticos, o de severidad alta, por el impacto que puedan tener sobre la provisión de servicios ATS en caso de fallo parcial o total. Sin embargo, existen riesgos adicionales, de menor severidad, que no son contemplados en este análisis.

4. Capítulo 4. Conclusiones

El objetivo principal del proyecto es estudiar la viabilidad de implementar una solución de torre de control remota en varios aeropuertos del norte de España, con menor densidad de tráfico aéreo, y proveer simultáneamente servicios ATS a los mismos desde un único emplazamiento, también de carácter remoto.

Para ello, se han estudiado los diferentes elementos tecnológicos que componen una torre de control y un centro de control remoto, al igual que las publicaciones de información aeronáutica de cada aeropuerto, con el fin de definir una propuesta a implementar en cada caso.

Asimismo, la implementación de la tecnología de los sistemas que componen una torre de control remota supone la introducción de nuevas funcionalidades y capacidades que facilitan la gestión del tráfico aéreo, asistiendo así al personal ATCO y contribuyendo a una mejora en la seguridad operacional.

Adicionalmente, el proyecto considera un objetivo secundario, relacionado con los costes operativos de las torres de control convencionales. La implementación de la solución propuesta contempla una reducción en los mismos, derivada de la centralización y optimización de los recursos disponibles, que supone una mejora en el rendimiento económico de los aeropuertos tratados.

Tras realizar un análisis cualitativo, se estima un ahorro del 64,10% de los costes operativos, sin tener en consideración la reducción en los costes derivados de las actividades de mantenimiento, por la complejidad de cálculo y comparación de los mismos.

Por consiguiente, atendiendo a los análisis realizados a lo largo de la elaboración del proyecto, se puede observar que es viable, tanto técnica como económicamente, la provisión simultánea de servicios ATS a múltiples aeropuertos, de menor densidad de tráfico, desde un único emplazamiento remoto. Adicionalmente, se respaldan, con estimaciones cualitativas, las ventajas económicas que supone implementar una solución de torre de control remota frente a las torres convencionales actuales.

4.1. Trabajo a Futuro

Como continuación a este proyecto, existen diversas líneas de investigación en las que es posible continuar trabajando. Varias de las incógnitas encontradas durante la elaboración del proyecto, que dependen de factores relacionados con la investigación, desarrollo y puesta en servicio de las torres de control remotas, se irán despejando a medida que se vayan regulando los procesos relacionados con el concepto, todavía novel a día de hoy.

Por otro lado, existen otras cuestiones que sí pueden ser tratadas y desarrolladas en un futuro. Entre ellas se destacan:

- Realizar un estudio de mercado (cuando varias alternativas estén disponibles) de los componentes tecnológicos, tanto en las torres remotas como en el centro de control, con el fin de barajar alternativas a la solución propuesta, que tengan en consideración diferentes presupuestos de implementación.
- Realizar un estudio, tanto económico como topográfico, del posible área de emplazamiento del centro de control remoto con el fin de analizar la viabilidad de dicha ubicación y contemplar alternativas.
- Desarrollar el plan de mantenimiento especificando el tipo de actividad a realizar (inspección visual, limpieza, ensayo, .., etc), el personal necesario para llevar acabo cada tarea y definir un calendario con los períodos de revisión al detalle.
- Desarrollar el análisis de riesgos, incluyendo aquellos de severidad media y baja, con el fin de elaborar un plan de mitigación completo que recoja gran parte de los riesgos y posibles escenarios que puedan afectar al correcto funcionamiento del sistema.
- Elaborar un plan de implementación, donde se detalle el proceso a seguir con el fin de implementar tanto las torres de control remotas en cada aeropuerto como el centro de control desde donde se proveerán servicios a los mismos.

5. Capítulo 5. Referencias Bibliográficas

Referencias

- [1] E. A. S. A. (EASA), Guidance Material on Remote Aerodrome Air Traffic Services, <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/acceptable-means-of-compliance-and-guidance-materials/gm-remote-tower-operations-1> (Marzo 2023).
- [2] DLR - tests a new Multiple Remote Tower concept, https://www.dlr.de/en/latest/news/2019/01/20190307_dlr-tests-new-multiple-remote-tower-concept (Enero 2019).
- [3] C. Weber, C. Weber, Expansion of the DFS Remote Tower Control Centre, <https://www.dfs.de/homepage/en/media/press/2022/28-04-2022-expansion-of-the-dfs-remote-tower-control-centre/> (Abril 2022).
- [4] Virtual and Remote Control Tower. Research, Design, Development, Validation and Implementation, 2nd Edition, Norbert Fürstenau, de, 2022. doi:10.1007/978-3-030-93650-1.
- [5] S. Sentinel, Signal Light Gun - Silent Sentinel, <https://silentsentinel.com/solutions/signal-light-gun/> (Agosto 2020).
- [6] Libretexts, 11.2.2: Servicio móvil aeronáutico, [https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingenier%C3%ADa_Aeroespacial/Fundamentos_de_Ingenier%C3%ADa_Aeroespacial_\(Arnedo\)/11%3A_Navegaci%C3%B3n_a%C3%A9rea-_CNS/11.02%3A_Sistemas_de_comunicaci%C3%B3n/11.2.02%3A_Servicio_m%C3%B3vil_aeron%C3%A1utico](https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingenier%C3%ADa_Aeroespacial/Fundamentos_de_Ingenier%C3%ADa_Aeroespacial_(Arnedo)/11%3A_Navegaci%C3%B3n_a%C3%A9rea-_CNS/11.02%3A_Sistemas_de_comunicaci%C3%B3n/11.2.02%3A_Servicio_m%C3%B3vil_aeron%C3%A1utico) (Noviembre 2022).
- [7] Indra, Indra and SANS, set to deploy the Middle East's first virtual air traffic control tower in Saudi Arabia, <https://www.indracompany.com/en/noticia/indra-sans-set-deploy-middle-east-s-first-virtual-air-traffic-control-tower-saudi-arabia>.
- [8] M. Caswell, Jersey becomes first British airport to use digital remote air traffic tower; Business Traveller, <https://www.businesstraveller.com/business-travel/2019/05/21/jersey-becomes-first-british-airport-to-use-digital-remote-air-traffic-tower/> (Mayo 2019).
- [9] I. A. Review, Avinor's digital remote towers system: Lessons learned and next steps, <https://www.internationalairportreview.com/article/179653/avinors-digital-remote-towers-system-lessons-learned-and-next-steps-2/> (Septiembre 2022).
- [10] Remote Towers Centre - KONGSBERG - Protecting People and Planet, <https://www.kongsberg.com/kmagazine/2019/1/remote-towers-centre-0/> (Enero 2019).
- [11] A. E. de Seguridad Aérea, ELABORACIÓN DE ESTUDIOS DE FAUNA Y SUS HÁBITATS EN ENTORNOS AEROPORTUARIOS, https://www.seguridadaerea.gob.es/sites/default/files/aup-17-itc-113_estudios_fauna_y_habitats.pdf (Enero 2017).
- [12] Aena, El Aeropuerto de Menorca ya tiene instaladas las cámaras que darán servicio a la torre remota, <https://www.aena.es/es/prensa/el-aeropuerto-de-menorca-ya-tiene-instaladas-las-camaras-que-daran---servicio-a-la-torre-remota.html> (Febrero 2022).
- [13] S. Torrado, La torre de control más vieja de España será sustituida por la inteligencia artificial, https://www.eldiario.es/illes-balears/sociedad/torre-control-vieja-espana-sera-sustituida-inteligencia-artificial_1_9850807.html (Enero 2023).

- [14] Aena, Aena instaló esta madrugada el soporte para las cámaras que darán servicio a la nueva torre de control remota de Vigo, <https://www.aena.es/es/prensa/aena-instalo-esta-madrugada-el-soporte-para-las-camaras-que-daran-servicio-a-la-nueva-torre-de-control-remota.html> (Febrero 2022).
- [15] F. De Vigo, Tres empresas pugnan para construir la nueva torre de control remoto de Peinador, <https://www.farodevigo.es/gran-vigo/2020/03/24/tres-empresas-pugnan-construir-nueva-15272744.html> (Marzo 2020).
- [16] ED-240A Change 1 - MINIMUM AVIATION SYSTEM PERFORMANCE STANDARD FOR REMOTE TOWER OPTICAL SYSTEMS, <https://www.eurocae.net/news/posts/2021/october/ed-240a-ch1-masps-for-remote-tower-optical-systems/> (Septiembre 2021).
- [17] BOE-A-2021-10028 Real Decreto 426/2021, de 15 de junio, por el que se modifican el Reglamento de Circulación Aérea, aprobado por el Real Decreto 57/2002, de 18 de enero, y el Real Decreto 1180/2018, de 21 de septiembre, por el que se desarrolla el Reglamento del aire y disposiciones operativas comunes para los servicios y procedimientos de navegación aérea; para actualizar la aproximación en pistas paralelas y las separaciones mínimas en las salidas y llegadas de los vuelos en los aeropuertos., https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2021-10028.
- [18] F. A. A. (FAA), Remote Tower System Pilot Program Operational Visual Requirements, <https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/operational-visual-requirements-2-1.pdf> (Enero 2023).
- [19] F. A. A. (FAA), Remote Tower (RT) Systems Minimum Functional and Performance Requirements for Non-federal Applications, <https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/Draft-Remote-Tower-Systems-Requirements-4-0.pdf> (Febrero 2023).
- [20] P. Calzón, HISPAFRA: libertad en el aire — ITRANSPORTE, <https://www.revistaitransporte.es/hispafra-libertad-en-el-aire/>.
- [21] Agencia Estatal de Seguridad Aérea, Servicios y funciones de navegación aérea, <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/ambitos/navegacion-aerea/proveedores-de-servicios-y-funciones-de-navegacion-aerea/servicios-y-funciones.html>.
- [22] A. E. de Seguridad Aérea, Listado de empresas certificadas por AESA en relación a los servicios de navegación aérea, https://www.seguridadaerea.gob.es/sites/default/files/listado_proveedores_ats_ais_cns_certificadas.pdf (Marzo 2024).
- [23] Tourinews, Quién es quién en la gestión privada de las torres de control españolas y sus conflictos, https://www.tourinews.es/economia-y-politica-turismo/espana-gestion-privada-torres-control-polemica-portobello-saerco_4473397_102.html (Febrero 2023).
- [24] ENAIRE, Red ENAIRE, https://www.enaire.es/sobre_enaire/conoce_enaire/red_enaire.
- [25] Aena, Estadísticas de tráfico aéreo, <https://www.aena.es/es/estadisticas/inicio.html>.
- [26] Aena, Estadísticas de tráfico aéreo: Informes detallados, <https://www.aena.es/es/estadisticas/informes-detallados.html>.
- [27] ENAIRE, AIP ESPAÑA: LEST - SANTIAGO/Rosalía de Castro, https://aip.enaire.es/AIP/contenido_AIP/AD/AD2/LEST/LE_AD_2_LEST_en.pdf (Noviembre 2022).
- [28] ENAIRE, AIP ESPAÑA: LEAS - ASTURIAS, https://aip.enaire.es/aip/contenido_aip/ad/ad2/leas/le_ad_2_leas_en.pdf (Febrero 2024).
- [29] ENAIRE, AIP ESPAÑA: LEXJ - SANTANDER/Seve Ballesteros-Santander, https://aip.enaire.es/aip/contenido_AIP/AD/AD2/LEXJ/LE_AD_2_LEXJ_en.pdf (Agosto 2023).

- [30] ENAIRE, AIP ESPAÑA: LEBB - BILBAO, https://aip.enaire.es/aip/contenido_AIP/AD/AD2/LEBB/LE_AD_2_LEBB_en.pdf (Febrero 2024).
- [31] ENAIRE, AIP ESPAÑA: LEVT - VITORIA, https://aip.enaire.es/AIP/contenido_AIP/AD/AD2/LEVT/LE_AD_2_LEVT_en.pdf (Mayo 2024).
- [32] ENAIRE, AIP ESPAÑA: LESO - SAN SEBASTIÁN, https://aip.enaire.es/aip/contenido_AIP/AD/AD2/LESO/LE_AD_2_LESO_en.pdf (Marzo 2024).
- [33] ENAIRE, AIP ESPAÑA: LEPP - PAMPLONA, https://aip.enaire.es/aip/contenido_AIP/AD/AD2/LEPP/LE_AD_2_LEPP_en.pdf (Diciembre 2023).
- [34] ENAIRE, AIP ESPAÑA: LERJ - LOGROÑO, https://aip.enaire.es/aip/contenido_AIP/AD/AD2/LERJ/LE_AD_2_LERJ_en.pdf (Mayo 2022).
- [35] M. Y. Tetiana Shmelova, Svetlana Kredentsar, Methodology for the selection of an optimal location of Remote Tower Centre, <https://ceur-ws.org/Vol-2732/20200102.pdf> (2020).
- [36] Libretexts, 9.4.2: Ayudas a la navegación aeroportuaria, [https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingenier%C3%ADa_Aeroespacial/Fundamentos_de_Ingenier%C3%ADa_Aeroespacial_\(Arnedo\)/09%3A_Aeropuertos/9.04%3A_Operaciones_aeroportuarias/9.4.02%3A_Ayudas_a_la_navegaci%C3%B3n_aeroportuaria](https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingenier%C3%ADa_Aeroespacial/Fundamentos_de_Ingenier%C3%ADa_Aeroespacial_(Arnedo)/09%3A_Aeropuertos/9.04%3A_Operaciones_aeroportuarias/9.4.02%3A_Ayudas_a_la_navegaci%C3%B3n_aeroportuaria) (Noviembre 2022).
- [37] KONGSBERG, 360^º Camera Module, https://www.kongsberg.com/globalassets/kongsberg-defence--aerospace/2.-what-we-do/1.3-defence--security/remote-weapon-systems/kongsberg-360-camera_final_crop-marks.pdf (Octubre 2021).
- [38] KONGSBERG, Pan Tilt Platform, https://www.kongsberg.com/globalassets/kongsberg-defence--aerospace/2.-what-we-do/1.3-defence--security/remote-weapon-systems/kongsberg-ptp_final_crop-marks.pdf (Octubre 2020).
- [39] KONGSBERG, Kongsberg Remote Towers, <https://www.kongsberg.com/globalassets/kongsberg-defence--aerospace/2.1.-products/defence-and-security/aviation-and-security/remote-and-digital-towers/kongsberg-remote-towers.pdf> (Marzo 2019).
- [40] SAAB, SAAB r-TWR Handbook, <https://www.saab.com/globalassets/products/ips/saab-digital-air-traffic-solutions/r-twr-handbook-2023.pdf> (2023).
- [41] ENAIRE, Plano de Estacionamiento y Atraque de Aeronaves - OACI (AD 2-LEVT PDC 1.1, https://aip.enaire.es/AIP/contenido_AIP/AD/AD2/LEVT/LE_AD_2_10_LEVT_en.html (Mayo 2024).
- [42] ENAIRE, Obstáculos de Aeródromo (AD 2.10-LEVT-1), https://aip.enaire.es/AIP/contenido_AIP/AD/AD2/LEVT/LE_AD_2_10_LEVT_en.html (Agosto 2023).
- [43] ENAIRE, Plano de Aeródromo - OACI (AD 2-LEVT ADC, https://aip.enaire.es/AIP/contenido_AIP/AD/AD2/LEVT/LE_AD_2_10_LEVT_en.html (Mayo 2024).
- [44] ENAIRE, Plano de Estacionamiento y Atraque de Aeronaves - OACI (AD 2-LESO PDC 1.1, https://aip.enaire.es/AIP/contenido_AIP/AD/AD2/LESO/LE_AD_2_LESO_PDC_1_en.pdf (Marzo 2024).
- [45] ENAIRE, Obstáculos de Aeródromo (AD 2.10-LESO-1), https://aip.enaire.es/AIP/contenido_AIP/AD/AD2/LESO/LE_AD_2_10_LESO_en.html (Marzo 2024).
- [46] ENAIRE, Plano de Aeródromo - OACI (AD 2-LESO ADC, https://aip.enaire.es/AIP/contenido_AIP/AD/AD2/LESO/LE_AD_2_LESO_ADC_1_en.pdf (Enero 2024).
- [47] ENAIRE, Plano de Estacionamiento y Atraque de Aeronaves - OACI (AD 2-LEPP PDC 1.1, https://aip.enaire.es/AIP/contenido_AIP/AD/AD2/LEPP/LE_AD_2_LEPP_PDC_1_en.pdf (Noviembre 2023).

- [48] ENAIRE, Obstáculos de Aeródromo (AD 2.10-LEPP-1), https://aip.enaire.es/AIP/contenido_AIP/AD/AD2/LEPP/LE_AD_2_10_LEPP_en.html (Julio 2021).
- [49] ENAIRE, Plano de Aeródromo - OACI (AD 2-LEPP ADC, https://aip.enaire.es/AIP/contenido_AIP/AD/AD2/LEPP/LE_AD_2_LEPP_ADC_1_en.pdf (Noviembre 2023).
- [50] ENAIRE, Plano de Estacionamiento y Atraque de Aeronaves - OACI (AD 2-LERJ PDC 1.1, https://aip.enaire.es/AIP/contenido_AIP/AD/AD2/LERJ/LE_AD_2_LERJ_PDC_1_en.pdf (Enero 2024).
- [51] ENAIRE, Obstáculos de Aeródromo (AD 2.10-LERJ-1), https://aip.enaire.es/AIP/contenido_AIP/AD/AD2/LERJ/LE_AD_2_10_LERJ_en.html (Diciembre 2022).
- [52] ENAIRE, Plano de Aeródromo - OACI (AD 2-LERJ ADC, https://aip.enaire.es/AIP/contenido_AIP/AD/AD2/LERJ/LE_AD_2_LERJ_ADC_1_en.pdf (Marzo 2024).
- [53] Case study for DANUBE FAB VCS project.
URL <https://www.danubefab.eu/article-news/danubefab-vcs>
- [54] 19955574 - online store.
URL https://selliliar.live/product_details/19955574.html
- [55] E. Flayers, La importancia de la torre de control en un aeropuerto, <https://europeanflyers.com/torre-control-aeropuerto/> (Abril 2024).
- [56] E. Hawkins, Who's Who in the Tower - IFR Magazine, <https://www.ifr-magazine.com/system/whos-who-in-the-tower/> (Agosto 2022).
- [57] Jesús, Nodos de red: Lo que necesitas saber acerca de los nodos de red, <https://www.dongee.com/tutoriales/nodos-de-red/> (Abril 2023).
- [58] R. E. de Supercomputación, Nodos de la RES — RES - Red Española de Supercomputación, <https://www.res.es/es/nodos-de-la-res>.
- [59] Aena, Presentación de resultados, correspondiente al ejercicio 2023, <https://www.aena.es/es/accionistas-e-inversores.html> (Febrero 2024).
- [60] F. A. A. (FAA), New ATC Tower Siting Technology to Enhance Safety, Cost Savings, https://www.tc.faa.gov/act4/insidethefence/2006/0102_14_tower_tech.htm.
- [61] E. Press, El aeropuerto de Pamplona pone en servicio la nueva torre de control, con una inversión de 8,6 millones, <https://www.europapress.es/turismo/transportes/aeropuertos/noticia-aeropuerto-pamplona-pone-servicio-nueva-torre-control-inversion-86-millones-20120620150415.html> (Junio 2012).
- [62] Aena, Aena Informa, Inauguración Logroño, <https://www.aena.es/doc/detalleprensa/12050310.pdf> (Mayo 2003).
- [63] S. G. d. S. d. N. A. y. A. Ministerio de Fomento, Plan Director, IV - Estimación Económica del Desarrollo Previsible del Aeropuerto de Castellón, https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/pdf/73C8D7E9-7B62-47B1-B54D-3CE002B9F126/54315/Estimacioneconomica.pdf.
- [64] S. G. d. S. d. N. A. y. A. Ministerio de Fomento, Plan Director, IV - Estimación Económica del Desarrollo Previsible del Aeropuerto de Fuerteventura, https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/pdf/99A4852C-0019-4180-AE20-69A7D321C9E3/54500/Estimacion_economica.pdf.
- [65] M. y. A. U. Ministerio de Transportes, BOE-A-2020-8427 - Resolución de 9 de julio de 2020, de la Entidad Pública Empresarial ENAIRE, por la que se publica el Convenio con AENA, S.M.E., SA, para el desarrollo e implantación del proyecto torre remota en los aeropuertos de AENA., https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2020-8427 (Julio 2020).

- [66] L. M. W. O. del Presidente del Gobierno y el Consejo de Ministros, Fijados los límites de actividad y los tiempos de descanso de los controladores aéreos, <https://www.lamoncloa.gob.es/consejodeministros/paginas/enlaces/300710-enlacecontroladores.aspx>.
- [67] M.Durgut, Air Traffic Controller Work-Shift Design, <https://www.aviationfile.com/air-traffic-controller-work-shift-design/> (Enero 2023).
- [68] I. Valle, Cuánto cobra un controlador aéreo en España, <https://www.20minutos.es/noticia/5220770/0/cuanto-cobra-un-controlador-aereo-espana/> (Marzo 2024).
- [69] C. Trautvetter, Study: Remote ATC towers Reduce Costs, Expand Service, <https://www.ainonline.com/aviation-news/business-aviation/2017-07-11/study-remote-atc-towers-reduce-costs-expand-service> (Julio 2017).
- [70] SESAR, OFA06.03.01 Remote Tower - Safety Assessment Report for Multiple Remote Tower, https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/solution/Sol152%204_Remote_Tower_two_low_density_airports_SAR.pdf (Junio 2015).
- [71] F. A. A. (FAA), Remote Tower (RT) Systems Operational Safety Assessment (OSA) for Non-Federal Applications, <https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-08/Remote-Tower-Systems-Operational-Safety-Assessment-Non-Federal-Applications.pdf> (Abril 2021).