

Proyecto Fin de Máster  
Máster Universitario de Ingeniería Aeronáutica

Estudio energético y económico de medidas de  
eficiencia energética en instalaciones aeroportuarias

Autor: Jesús Rosete Parro

Tutor: José Manuel Salmeron Lissen

Dpto. de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022





Trabajo Fin de Máster  
Máster Universitario de Ingeniería Aeronáutica

***Estudio energético y económico de medidas de eficiencia  
energética en instalaciones aeroportuarias***

Autor:

Jesús Rosete Parro

Tutor:

José Manuel Salmeron Lissen  
Profesor Titular de Universidad

Dpto. de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2022



Proyecto Fin de Máster: Estudio energético y económico de medidas de eficiencia energética en instalaciones aeroportuarias

Autor: Jesús Rosete Parro

Tutor: José Manuel Salmeron Lissen

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*

*A mi pareja*

*A mis amigos*



# Agradecimientos

---

Este proyecto representa el fin de una etapa que no lo habría conseguido sin el apoyo de todas las personas que me rodean. A mi familia y a mi pareja, por confiar en mí, por convencerme de que todo es posible en esta vida y demostrarme que nunca hay que tirar la toalla porque todo esfuerzo tiene una recompensa. A mis amigos, por acompañarme en todo proceso de mi formación, por no sentirme solo aun estando en la distancia. A mis compañeros, que me han demostrado que el trabajo en grupo y la cooperación son un pilar fundamental en la vida. A mis profesores, y en especial a mi tutor José Manuel Salmeron, por acompañarme, guiarme y ayudarme en todo lo que he necesitado.

Gracias por confiar en mí

*Jesús Rosete Parro*

*Sevilla, 2022*



Este proyecto recoge un análisis energético y económico de medidas de eficiencia energética en instalaciones aeroportuarias. Consiste en la implementación de energías renovables en el Aeropuerto de Sevilla para la generación del 100% de la energía consumida mediante energía verde.

En el primer capítulo se presenta una introducción al estudio donde se detalla la motivación del proyecto, los objetivos que se esperan conseguir y el alcance del análisis.

En el segundo capítulo se profundiza en las características de las fuentes de energías renovables más características, la energía solar y la energía eólica, describiendo por consiguiente los conceptos básicos relacionados y sus propiedades. Por otro lado, se presenta una serie de artículos mostrando la situación actual en el mundo que nos rodea. Asimismo, se enuncian algunos aeropuertos de todo el mundo donde han empezado a estudiar las distintas formas para la generación de energía in-situ mediante energías renovables.

En el tercer capítulo se realiza el estudio de la implementación de la energía renovable en el Aeropuerto de Sevilla, siendo la energía solar fotovoltaica la elegida. En primer lugar, se define el punto de partida y se recogen los diferentes datos del aeropuerto. Posteriormente, se diseñan las centrales energéticas fotovoltaicas, una dentro de la instalación aeroportuaria y otra en sus inmediaciones, proporcionando energía suficiente para abastecer al aeropuerto. En tercer lugar, se estima gracias a la bibliografía consultada que se reduce casi 8 toneladas de dióxido de carbono gracias a la implementación de los campos fotovoltaicos. Por último, se realiza un análisis económico y de rentabilidad.

En el cuarto capítulo se exponen las diferentes certificaciones que debe tener el aeropuerto para la implementación del campo fotovoltaico, demostrando a los responsables de la seguridad aérea la necesidad de sacar una normativa para la instalación de placas fotovoltaicas en las proximidades del aeropuerto.

Finalmente, en el quinto capítulo se comentan las conclusiones obtenidas en el análisis junto con una propuesta de futuro.



<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Índice</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xvii</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Objetivo</i>	1
1.2. <i>Alcance</i>	2
<b>2. Estado del Arte</b>	<b>3</b>
2.1. <i>Energías Renovables</i>	3
2.1.1. <i>Energía Solar</i>	3
2.1.2. <i>Energía Fotovoltaica</i>	4
2.1.3. <i>Energía Eólica</i>	8
2.2. <i>Análisis de la situación de mercado</i>	10
2.2.1. <i>Documentos Asociados</i>	10
2.2.2. <i>Casos de Estudio</i>	25
2.2.3. <i>Normas Técnicas</i>	32
<b>3. Descripción del Estudio</b>	<b>35</b>
3.1. <i>Punto de Partida y Recolección de datos del aeropuerto</i>	35
3.2. <i>Diseño de las centrales energéticas</i>	42
3.2.1. <i>Diseño de central fotovoltaica en las instalaciones aeroportuarias</i>	42
3.2.2. <i>Diseño de central fotovoltaica en las proximidades del aeropuerto</i>	51
3.3. <i>Estimación de la reducción de CO<sub>2</sub></i>	53
3.4. <i>Análisis económico y de rentabilidad</i>	54
3.4.1. <i>Presupuesto de la instalación del Aeropuerto</i>	54
3.4.2. <i>Presupuesto de la instalación en las proximidades del Aeropuerto</i>	54
<b>4. Certificación del Aeropuerto</b>	<b>58</b>
4.1. <i>Limitación de obstáculos</i>	58
4.2. <i>Afección a controladores y conductores de la zona de operaciones</i>	58
4.3. <i>Interferencias</i>	58
4.4. <i>Reflejo de la luz del sol para las tripulaciones de vuelo</i>	58
<b>5. Conclusiones y Propuesta de mejora</b>	<b>61</b>
<b>Referencias</b>	<b>63</b>
<b>Anexo A: Consumo Aeropuerto Sevilla</b>	<b>66</b>
<b>Anexo B: CS ADR-DSN.M.615 General [30]</b>	<b>69</b>
<b>Anexo C: Estudio de Seguridad</b>	<b>72</b>



# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2-1. Declinación en función del día del mes	7
Tabla 2-2. Listado de Energías Renovables en los Aeropuertos	15
Tabla 2-3. Especificaciones del módulo solar e inverter	16
Tabla 2-4. Energía producida a lo largo de cada mes	21
Tabla 2-5: Aeropuertos que utilizan Energías Renovables	29
Tabla 2-6: Proyectos de implementación de Energía Renovable	30
Tabla 3-1: Histórico de Consumo Energético/Pasajeros/Consumo promedio en el Aeropuerto de Sevilla	39
Tabla 3-2: Estimación del consumo energético en 2019 (Anual).	40
Tabla 3-3: Porcentaje de energía consumida mensualmente	40
Tabla 3-4: Perfil de uso energético del Aeropuerto de Sevilla 2019.	41
Tabla 3-5: Superficie operativa para inclusión placas fotovoltaicas	44
Tabla 3-6: Cálculo de la potencia de planta fotovoltaica	45
Tabla 3-7: Calculo de la potencia (kW) del campo fotovoltaico en función de la configuración de los módulos.	47
Tabla 3-8: Longitud de fila en función de la cantidad de módulos en serie	48
Tabla 3-9: Longitud de columnas en función de la cantidad de módulos en paralelo	49
Tabla 3-10: Cálculo de subcampos en las instalaciones aeroportuarias	49
Tabla 3-11: Resumen de la configuración final placas fotovoltaicas dentro del aeropuerto	50
Tabla 3-12: Porcentaje de potencia mensual generado	50
Tabla 3-13: Energía generada y Energía restante necesaria	51
Tabla 3-14: Características de la instalación en las proximidades del aeropuerto	52
Tabla 3-15: Presupuesto campo fotovoltaico en las instalaciones aeroportuarias	54
Tabla 3-16: Presupuesto campo fotovoltaico en las proximidades del aeroportuario	55
Tabla 3-17: Presupuesto total de la instalación del campo fotovoltaico.	56
Tabla 3-18: Estudio de rentabilidad del proyecto	57



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2-1. Célula solar (Medio semiconductor)	4
Figura 2-2. Esquema de la una instalación fotovoltaica	5
Figura 2-3. Posibilidad de conexionado módulo fotovoltaico	6
Figura 2-4. Instalación centralizada (izquierda) e instalación descentralizada (derecha)	6
Figura 2-5. Ángulo de incidencia.	6
Figura 2-6. Cálculo de distancia mínima entre placas	8
Figura 2-7. Interior de una góndola	9
Figura 2-8. Relación de emisión de CO <sub>2</sub> y la demanda energética	14
Figura 2-9. Consumo Eléctrico General de los Aeropuertos	14
Figura 2-10. Ángulo de perfil y de altitud solar para PV con ángulo acimutal	17
Figura 2-11. Sección de dos filas del conjunto de módulos fotovoltaicos	18
Figura 2-12. Triángulo para calcular la longitud máxima de la sombra del módulo.	18
Figura 2-13. Diagrama de flujo que muestra la metodología adoptada por el autor	19
Figura 2-14. Configuración de un subcampo fotovoltaico.	20
Figura 2-15. Señalamiento y Balizamiento de un Aerogenerador en Aeropuerto	23
Figura 2-16. Evolución de la Información de la Energía Renovable	25
Figura 2-17. Aerogeneradores y paneles solares en el Aeropuerto de Seymour	25
Figura 2-18. Proyecto solar en el aeropuerto George	26
Figura 2-19. Instalación solar del aeropuerto	26
Figura 2-20. Proyecto Solar en el Aeropuerto de San Diego	27
Figura 2-21. Aerogeneradores en el aeropuerto internacional de Kansai	27
Figura 2-22. Consumo Eléctrico Anual 2018 Aeropuerto de Lanzarote (GWh)	28
Figura 2-23: Mapa mundi con aeropuertos estudiados	31
Figura 2-24: Aeropuertos Europeos – Energías Renovables	31
Figura 2-25: Aeropuertos Asiáticos - Energías Renovables	32
Figura 2-26: Aeropuerto África - Energías Renovables	32
Figura 2-27: Aeropuertos Americanos - Energías Renovables	32
Figura 2-28: Áreas y Superficies de Servidumbre de los Aeródromos	33
Figura 3-1: Localización del aeropuerto de Sevilla	35
Figura 3-2: Volumen anual de tráfico de pasajeros en el Aeropuerto de Sevilla [22]	36
Figura 3-3: Volumen mensual de tráfico de pasajeros en el Aeropuerto de Sevilla en 2019 [22]	36
Figura 3-4: Temperaturas en el Aeropuerto de Sevilla en 2020. [23]	36
Figura 3-5: Estado mensual del clima en Sevilla [23]	37
Figura 3-6: Radiación Global en el Aeropuerto de Sevilla	37

Figura 3-7: Radiación Difusa en el Aeropuerto de Sevilla	37
Figura 3-8: Radiación Directa en el Aeropuerto de Sevilla	38
Figura 3-9: Intensidad y dirección del viento en el Aeropuerto de Sevilla	38
Figura 3-10: Rosa de Vientos en el Aeropuerto de Sevilla	39
Figura 3-11: Perfil de uso energético del Aeropuerto de Sevilla 2019.	41
Figura 3-12: Superficie de Terminal y parking principal P1	42
Figura 3-13: Superficie del parking de larga duración P2	42
Figura 3-14: Superficie del hangar	43
Figura 3-15: Superficie de la antigua terminal	43
Figura 3-16: Superficie de la terminal de carga	43
Figura 3-17: Cálculo de la distancia mínima entre módulos	48
Figura 3-18: Posible superficie anexa al aeropuerto para incorporación de instalación	52
Figura 4-1: Porcentaje de reflexión solar a medida de la variación del ángulo de la placa [29]	59



# 1. INTRODUCCIÓN

---

En las últimas décadas, el consumo de energía y las emisiones de gases nocivos a la atmósfera ha crecido de forma exponencial, la tendencia de la demanda energética sigue aumentando en la mayoría de las principales fuentes de energía. Actualmente esto deriva un problema a escala mundial debido a la gran contaminación que supone la generación de tanta cantidad de energía, provocando lo que hoy se conoce “Cambio climático”.

Mediante el Acuerdo de París aprobado en el 2015, las Naciones Unidas acordaron realizar un esfuerzo extra para aumentar las ambiciones climáticas en el tiempo. Además, gracias a este acuerdo, se logró unir a los diferentes países por una causa común, realizar medidas para frenar este cambio.

En este sentido, la Unión Europea ha declarado la emergencia climática para revertir este efecto emitiendo el orden de una reducción del 40% de los gases emitidos de los vehículos de transporte entre 2020 y 2030. La aviación, y sobre todo en los aeropuertos, consumen una gran cantidad de energía, por lo que la Unión Europea quiere reducir un 20% la energía obtenida a partir de recursos fósiles en todos los aeropuertos europeos antes del 2030.

A pesar de la ligera reducción de las emisiones de gases tóxicos a la atmósfera, las concentraciones de gases de efecto invernadero han seguido aumentando, alcanzando registros históricos. Este es uno de los puntos más críticos con respecto al cambio climático, ya que es necesario reducir drásticamente las emisiones para estabilizar la temperatura global de la tierra. Un ejemplo de esto es la gran cantidad de dióxido de carbono que se expulsa en España, emitiendo 274.6 millones de toneladas en el 2020.

Al emitir estas grandes cantidades de gases, la temperatura del planeta está en constantemente aumento. Esto supone aspectos muy negativos para el medioambiente, ya que por cada tonelada de dióxido de carbono contribuye al deshielo de 3  $m^2$  de hielo en el Ártico. Asimismo, la situación medioambiental debe preocupar a la población, ya que cada vez es más común el término de “sequía” en los meses de verano. Esta anomalía climatológica destaca por la falta de agua para el abastecimiento, debido sobre todo a la falta de lluvias en los meses de invierno.

Debido a la situación pandémica, en los últimos dos años se ha reducido drásticamente el uso de los medios de transporte, reduciendo así la contaminación medioambiental. Esta situación ha dado un “respiro” al medioambiente, pero hoy en día se está recuperando la movilidad nacional e internacional, ya sea por trabajo o turismo, lo que provoca que el sector aeronáutico esté cada vez más activo.

Los datos de la energía en el sector aeronáutico en España destacan por el uso de recursos fósiles y/o nucleares, siendo por tanto necesario realizar una disminución de su utilización debido al impacto que pueden causar estos en el medio ambiente, y la gran cantidad de gases que se produce para su obtención.

Poco a poco, y con ayuda de los gobiernos, las energías renovables van teniendo más protagonismo a lo largo de los años. Muchos gobiernos no solo están apostando por las energías renovables por el medioambiente, también para el progreso y la innovación del país.

## 1.1. Objetivo

El objetivo principal del presente proyecto es realizar un estudio energético y económico de medidas de eficiencia energética en instalaciones aeroportuarias, es decir, un estudio para la implementación de energía renovable en el Aeropuerto de Sevilla para abastecer el 100% de la energía consumida mediante energía verde.

Para ello, se analizarán las peculiaridades de las diferentes energías renovables que se pueden utilizar cerca de las instalaciones aeroportuarias. Asimismo, se estudia la situación actual de mercado analizando artículos y proyectos de interés recogidos en la base de datos de la *Universidad de Sevilla* y *Scopus*, mostrando la gran cantidad de aeropuertos nacionales e internacionales que utilizan este recurso natural.

Del mismo modo, se analiza qué requisitos técnicos y normativos son los necesarios para la incorporación de este método de generación de energía, partiendo de una recolección de datos del aeropuerto, el diseño de las diferentes centrales eléctricas y el análisis económico. Se estudia además la rentabilidad que puede poseer el proyecto debido a la gran inversión económica que se tiene que realizar para la implementación de la instalación.

A causa de las preocupaciones climatológicas que se tiene en la actualidad, se tiene como objetivo la reducción masiva de gases nocivos que se expulsan a la atmósfera, así como el ahorro económico que supone el uso de estas energías.

## 1.2. Alcance

El proyecto va a componerse de los siguientes estudios:

- Actualmente existe una gran variedad de energías renovables, no todas ellas son aptas para la incorporación cerca de un aeropuerto, por lo que se realiza un análisis de las posibles energías renovables que se puedan incorporar en las instalaciones aeroportuarias o en sus inmediaciones. Asimismo, se estudia las características principales de estas energías así como los aspectos claves para su uso.
- El uso de energía renovables está siendo cada vez más común entre los aeropuertos, por lo que se realiza un análisis de la situación actual mediante diferentes proyectos, además de estudiar la viabilidad del uso de energía renovable en diferentes aeropuertos del mundo.
- Análisis de viabilidad del uso de energía fotovoltaica en el Aeropuerto de Sevilla, es decir, investigar si es posible abastecer toda la energía que se consume en las instalaciones aeroportuarias mediante energía renovable. Este estudio se va a dividir en:
  - Punto de partida y recolección de datos del aeropuerto: Se analiza el punto de partida del proyecto así como todos los datos necesarios para el diseño de la instalación
  - Diseño de las centrales energéticas: Se realiza una simulación analizando la necesidad de potencia y el diseño de la instalación.
  - Estimación de la reducción de CO<sub>2</sub>: Gracias a la bibliografía se puede aproximar la cantidad de gases nocivos que se puede reducir con la implementación del diseño anterior.
  - Análisis económico y de rentabilidad: Debido al gran coste que supone la implementación es necesario realizar un análisis económico para determinar cuánto sale el proyecto así como la rentabilidad del mismo.
- Análisis de requisitos normativos relativos a la incorporación de placas fotovoltaicas: Se realiza un barrido normativo para ver los requisitos necesarios para que la instalación sea segura tanto para los pilotos como para los pasajeros.
- Conclusiones y propuesta de mejora.
- Bibliografía.

## 2. ESTADO DEL ARTE

---

Las energías renovables son una fuente de energía limpia, inagotable y con una gran competencia entre los diferentes países. Existen numerosas ventajas con respecto a los combustibles fósiles entre los que destaca su diversidad, su abundancia y, sobre todo, la potencia de aprovechamiento de estas en cualquier parte del planeta sin que se produzcan gases que potencien el efecto invernadero.

El desarrollo de las energías limpias es imprescindible para combatir el cambio climático. Es por ello, por lo que ha recibido un importante respaldo en la comunidad internacional gracias al “Acuerdo de París” suscrito en la Cumbre Mundial del Clima. Entre la gran multitud de energías renovables que se encuentran en el mercado, se va a destacar en este proyecto la energía solar, la energía fotovoltaica y la energía eólica.

### 2.1. Energías Renovables

#### 2.1.1. Energía Solar

El Sol es una estrella con un diámetro de 1.4 millones de kilómetros formada por diversos elementos gaseosos entre los que destaca el hidrógeno. Este astro produce de forma espontánea e ininterrumpida un proceso de fusión nuclear que disipa una potencia de  $3.7 \cdot 10^{14}$  TW. No toda la energía que emite el Sol llega a la Tierra ya que está situada a 150 millones de kilómetros por lo que la potencia interceptada por la Tierra es de 173000 TW aproximadamente.

Uno de los parámetros más importantes en esta energía es la constante solar. Esta se define como la cantidad de energía solar recibida por unidad de superficie y unidad de tiempo sobre una superficie perpendicular al Sol situada en el límite de la atmósfera, a la distancia media anual Tierra-Sol. Su valor es de  $1.353 \text{ W/m}^2$  y representa la energía media que llega a la capa más externa de la atmósfera terrestre. [1]

Por otro lado, esta energía corresponde a una radiación electromagnética formada por un conjunto de longitudes de onda, cuya velocidad de propagación es de 300.000 km/s. La descomposición de esta radiación origina el llamado espectro solar, el cual está formado por tres bandas de longitudes de onda, comprendidas entre los siguientes valores:

- Ultravioleta:  $\lambda < 0.35 \mu\text{m}$
- Visible:  $0.35 \mu\text{m} < \lambda < 0.75 \mu\text{m}$
- Infrarrojo:  $\lambda > 0.75 \mu\text{m}$

Cada longitud de onda transporta una cantidad de energía, siendo el valor máximo a  $0,47 \mu\text{m}$ , es decir, dentro de la zona visible del espectro solar. En conjunto, la radiación visible transporta el 47% de la energía solar, la radiación IR, el 46%, mientras que la radiación UV transporta el 7% restante. [1]

Asimismo, esta fuente de energía presenta dos características fundamentales que las hace diferenciar con las energías convencionales, la dispersión e intermitencia. La dispersión ocurre cuando un fotón afecta a un obstáculo sin ser absorbido cambiando solamente la dirección del recorrido. La radiación solar viaja en línea recta, pero debido a los gases y a las partículas presentes en la atmósfera, esta energía se desvía, es por eso por lo que la energía solar presenta una gran dispersión. Por otro lado, se encuentra la intermitencia, en ausencia de un sistema de almacenamiento de la propia energía, la energía solar no produce energía durante la noche o con mal tiempo.

El primer paso a la hora de aprovechar la energía solar es la captación de la energía. Se pueden distinguir dos sistemas de características muy diferenciados entre sí:

- Sistemas pasivos: Se utilizan para captar y acumular el calor proveniente del sol. No necesitan ningún dispositivo para captar la energía solar. Ejemplo: Suelos radiantes.

- Sistemas activos: Se basa en la captación de la radiación solar por medio de un elemento denominado colector. Ejemplo: placas solares.

Existen dos efectos físicos que permiten la conversión directa de la radiación solar en energía eléctrica: el termoelectrónico (casi nula aplicación actual) y el fotoeléctrico. En el primero, la corriente eléctrica se produce a partir del calor de la radiación luminosa, mientras que, en el segundo, es la energía de los corpúsculos constituyentes de la luz (fotones) la que se aprovecha para producir electricidad. [1]

La radiación solar no es uniforme en toda la tierra y varía principalmente según en la región en la que se encuentre. En la zona sur, esta radiación solar varía entre 1700 y 1900 kWh. Como norma general, se toma una radiación solar de referencia que es la considerada anteriormente como *Constante Solar*.

Para determinar el valor de radiación emitida existen los siguientes términos:

- Irradiancia solar: Potencia radiante incidente por unidad de superficie solar sobre un plano dado.
- Irradiación solar: Energía incidente por unidad de superficie sobre un plano dado, durante un intervalo de tiempo.

Además, la radiación solar llega a la superficie terrestre a partir de los siguientes componentes:

- Radiación directa: Formados por rayos procedentes del Sol directamente (no llegan a ser dispersados).
- Radiación difusa: Radiación procedente de toda bóveda celeste, excepto la solar.
- Radiación del albedo: Radiación procedente del suelo debido a la reflexión de parte de la radiación incidente sobre montañas, edificios...

### 2.1.2. Energía Fotovoltaica

El efecto fotovoltaico es la producción de una fuerza electromotriz en un material o medio semiconductor, denominado célula solar, como consecuencia de la absorción de la radiación. Una de las características fundamentales del medio semiconductor es la existencia de dos tipos de portadores de corriente, uno dotado con cargas negativas (electrones libres) y otro dotado con cargas positivas con igual magnitud, denominado huecos.

La célula solar está constituida por dos regiones, un semiconductor tipo p (carga positiva) y otro semiconductor tipo n (carga negativa). Al exponer esta unión a la radiación solar se produce una circulación de los electrones y, una vez que se conecta a una carga, produce corriente eléctrica de forma continua, Figura 2.1 [1] [2].

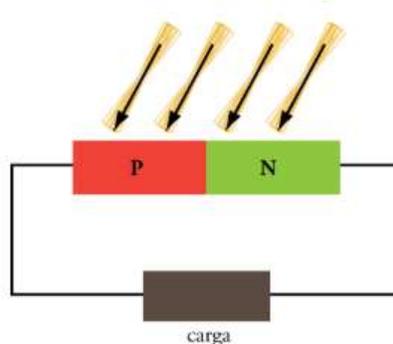


Figura 2-1. Célula solar (Medio semiconductor)

Una instalación fotovoltaica, Figura 2.2, está compuesta por una gran variedad de equipos, entre los que se destacan:

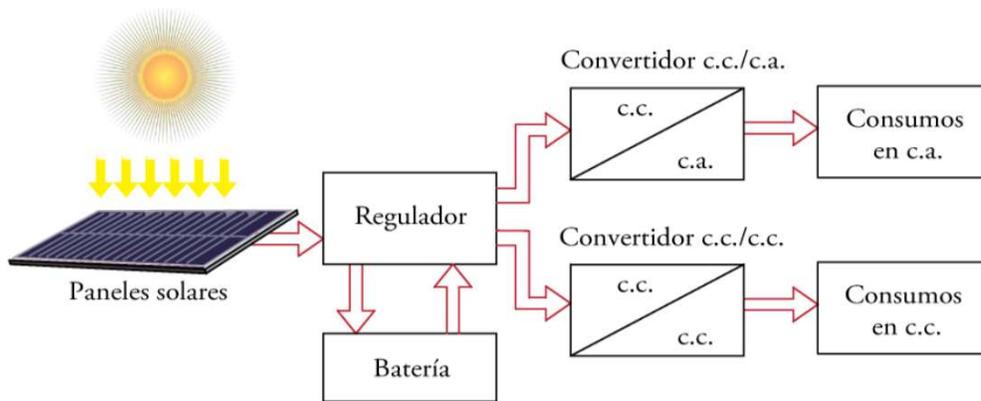


Figura 2-2. Esquema de la una instalación fotovoltaica

- Captador Solar Fotovoltaico → Su función principal es transformar la energía radiante en energía eléctrica. Está formada por aproximadamente 30 células solares conectadas en serie (Es el fabricante quien decide el número mínimo de células para garantizar la carga efectiva de las baterías). La superficie del panel oscila entre 0.5 y 1.3 m<sup>2</sup>, en la cual las diferentes células están ensambladas entre un cristal de silicio (parte superior) y un material plástico (parte inferior). En el mercado existe una gran variedad entre los que destacan el panel solar monocristalinos/policristalinos y los paneles solares de sulfuro de cadmio y sulfuro de cobre
- Regulador → La función principal del regulador es evitar las sobrecargas en los acumuladores, además de asegurar que el sistema trabaja con máxima eficiencia. Existen dos tipos de regulares, el regulador paralelo y el regulador serie. Se diferencia en la forma de trabajo, pero sobre todo en el precio de cada uno de ellos. Los reguladores paralelo se usa en instalaciones pequeñas, por otro lado, el regulador en serie para instalaciones con intensidades elevadas.
- Batería → Encargada de almacenar la energía eléctrica que produce la placa solar fotovoltaica. Estas según su razón de uso pueden ser:
  - Estacionarias: Destinadas a permanecer fija en un determinado lugar con corrientes permanentes.
  - De arranque: Previstas para suministrar una cantidad elevada de energía eléctrica en segundos.
- Convertidor de corriente → Dispositivo capaz de transformar la corriente eléctrica de manera que resulte apta para el uso. Los convertidores más destacados son los convertidores de corriente continua-corriente continua (c.c. – c.c.) y convertidores de corriente continua – corriente alterna (c.c. – c.a.)
- Elementos para el conexionado y funcionamiento → Como norma general, nunca se conectará entre sí módulos de distinta característica ni de distinto fabricante, aspecto para tener en cuenta en el proceso de instalación. Existen tres posibilidades de conexionado, Figura 2.3:
  - Conexionado en paralelo: Se conectan entre sí todos los polos positivos y todos los polos negativos
  - Conexionado en serie: La conexión se hace del polo positivo al polo negativo siguiente
  - Conexionado mixto: Intervienen ambos conexionados teniendo en cuenta que deben tener el mismo número de módulos y estar conectados de igual forma.

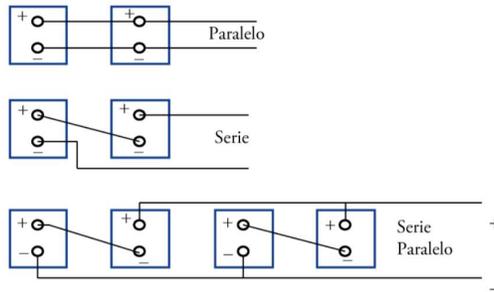


Figura 2-3. Posibilidad de conexionado módulo fotovoltaico

La configuración de las instalaciones solar fotovoltaica podrá variar dependiendo del uso que se quiera dar. Se destacan la instalación centralizada y la descentralizada. La diferencia entre ambas instalaciones es la propia generación solar. En las instalaciones independientes está formada por el sistema para cada establecimiento y la centralizada posee un sistema para un conjunto de establecimientos, Figura 2.4.



Figura 2-4. Instalación centralizada (izquierda) e instalación descentralizada (derecha)

### Instalación de las plantas fotovoltaicas.

Para que el módulo fotovoltaico recoja la máxima energía, este panel tiene que orientarse perpendicularmente al Sol. Como el Sol y la Tierra siempre están en movimiento, una de las soluciones más desarrolladas es la creación de un instrumento que fuera capaz de hacer que el módulo siguiese al Sol. Se debe tener en cuenta algún criterio para dirigir la orientación que debe poseer el módulo. Para ello se utilizará los siguientes parámetros:

- **Acimut ( $\alpha$ )**: Ángulo que mide la desviación con respecto al hemisferio Sur
- **Elevación ( $\beta$ )**: Ángulo formado por la superficie del módulo y el plano horizontal
- **Incidencia ( $\phi$ )**: Ángulo que forman la radiación directa sobre el módulo, Figura 2.5
- **Declinación ( $\delta$ )**: Ángulo que forma el plano ecuador de la tierra con los rayos incidentes del Sol

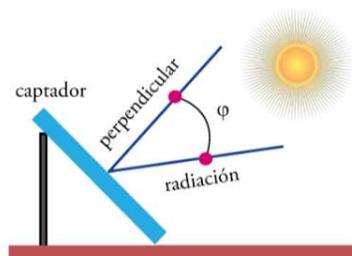


Figura 2-5. Ángulo de incidencia.

Además, para tener el máximo aprovechamiento de la planta fotovoltaica, hay que tener en cuenta las posibles sombras sobre los propios módulos fotovoltaicos ya que cuando se instalan un grupo de placas, hay que definir la distancia mínima que habrá entre filas para que no proyecten sombras entre ellas. Es por ello

por lo que, para determinar la sombra, primero se debe calcular la distancia mínima entre los módulos a partir de trigonometría.

Un aspecto de gran importancia sobre la determinación de la distancia mínima es la altura solar mínima, que dependerá de cada día del año. La altura mínima se define como:

$$H_{min} = (90^\circ - \text{latitud del lugar}) - \text{declinación solar}$$

La declinación solar en función de los días del año se muestra en la Tabla 2.1.

TABLA DE DECLINACIÓN SOLAR												
Día	enero	feb.	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	sept.	oct.	nov.	dic.
1	-23.01	-17.52	-8.29	4.02	14.90	22.04	23.12	17.91	7.72	-4.22	-15.36	-22.11
2	-22.93	-17.25	-7.91	4.41	15.21	22.17	23.05	17.65	7.34	-4.61	-15.67	-22.24
3	-22.84	-16.97	-7.53	4.81	15.52	22.30	22.97	17.38	6.96	-5.01	-15.96	-22.36
4	-22.75	-16.69	-7.15	5.20	15.82	22.42	22.89	17.11	6.57	-5.40	-16.26	-22.48
5	-22.65	-16.40	-6.76	5.60	16.11	22.54	22.80	16.83	6.18	-5.79	-16.55	-22.59
6	-22.54	-16.11	-6.38	5.99	16.40	22.65	22.70	16.55	5.79	-6.18	-16.83	-22.70
7	-22.42	-15.82	-5.99	6.38	16.69	22.75	22.59	16.26	5.40	-6.57	-17.11	-22.80
8	-22.30	-15.52	-5.60	6.76	16.97	22.84	22.48	15.96	5.01	-6.96	-17.38	-22.89
9	-22.17	-15.21	-5.20	7.15	17.25	22.93	22.36	15.67	4.61	-7.34	-17.65	-22.97
10	-22.04	-14.90	-4.81	7.53	17.52	23.01	22.24	15.36	4.22	-7.72	-17.91	-23.05
11	-21.90	-14.59	-4.41	7.91	17.78	23.09	22.11	15.06	3.82	-8.10	-18.17	-23.12
12	-21.75	-14.27	-4.02	8.29	18.04	23.15	21.97	14.74	3.42	-8.48	-18.42	-23.18
13	-21.60	-13.95	-3.62	8.67	18.30	23.21	21.83	14.43	3.02	-8.86	-18.67	-23.24
14	-21.44	-13.62	-3.22	9.04	18.55	23.27	21.67	14.11	2.62	-9.23	-18.91	-23.29
15	-21.27	-13.29	-2.82	9.41	18.79	23.31	21.52	13.78	2.22	-9.60	-19.15	-23.34
16	-21.10	-12.95	-2.42	9.78	19.03	23.35	21.35	13.45	1.81	-9.97	-19.38	-23.37
17	-20.92	-12.62	-2.02	10.15	19.26	23.39	21.18	13.12	1.41	-10.33	-19.60	-23.40
18	-20.73	-12.27	-1.61	10.51	19.49	23.41	21.01	12.79	1.01	-10.69	-19.82	-23.42
19	-20.54	-11.93	-1.21	10.87	19.71	23.43	20.82	12.45	0.61	-11.05	-20.03	-23.44
20	-20.34	-11.58	-0.81	11.23	19.93	23.44	20.64	12.10	0.20	-11.40	-20.24	-23.45
21	-20.14	-11.23	-0.40	11.58	20.14	23.45	20.44	11.75	-0.20	-11.75	-20.44	-23.45
22	-19.93	-10.87	0.00	11.93	20.34	23.45	20.24	11.40	-0.61	-12.10	-20.64	-23.44
23	-19.71	-10.51	0.40	12.27	20.54	23.44	20.03	11.05	-1.01	-12.45	-20.82	-23.43
24	-19.49	-10.15	0.81	12.62	20.73	23.42	19.82	10.69	-1.41	-12.79	-21.01	-23.41
25	-19.26	-9.78	1.21	12.95	20.92	23.40	19.60	10.33	-1.81	-13.12	-21.18	-23.39
26	-19.03	-9.41	1.61	13.29	21.10	23.37	19.38	9.97	-2.22	-13.45	-21.35	-23.35
27	-18.79	-9.04	2.02	13.62	21.27	23.34	19.15	9.60	-2.62	-13.78	-21.52	-23.31
28	-18.55	-8.67	2.42	13.95	21.44	23.29	18.91	9.23	-3.02	-14.11	-21.67	-23.27
29	-18.30		2.82	14.27	21.60	23.24	18.67	8.86	-3.42	-14.43	-21.83	-23.21
30	-18.04		3.22	14.59	21.75	23.18	18.42	8.48	-3.82	-14.74	-21.97	-23.15
31	-17.78		3.62		21.90		18.17	8.10		-15.06		-23.09

Tabla 2-1. Declinación en función del día del mes

La distancia mínima entre las líneas de los captadores se determina a partir de la Ecuación 2-1 y la Figura 2.6:

$$\text{distancia mínima} = B \cdot \cos \beta + \frac{B \cdot \text{sen } \beta}{\tan H_{min}}$$

Ecuación 2-1: Cálculo de distancia mínima

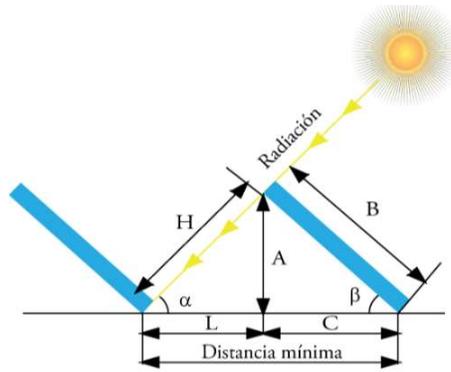


Figura 2-6. Cálculo de distancia mínima entre placas

### 2.1.3. Energía Eólica

La energía eólica es aquella energía que se obtiene a partir de la energía cinética producida por el efecto de las corrientes de aire. Esta energía se puede convertir en electricidad a través de un generador que convierte el movimiento de las palas en energía.

El crecimiento desmesurado avivado sobre todo por la competencia energética y financiera ha dado lugar a un crecimiento sustancial del uso de este tipo de tecnología. Tal ha sido su crecimiento que, en menos de 30 años, la potencia unitaria de los aerogenerados se ha multiplicado casi por 100 [3]. En España la energía eólica abastece aproximadamente el 20% de las necesidades del país.

Por otro lado, la elección del aerogenerador está limitado por las condiciones climatológicas y del terreno, buscando siempre la máxima rentabilidad. Las turbinas con mayor tamaño pueden rentabilizar mucho el proyecto, pero puede que la instalación de estas sea imposible por limitaciones del terreno.

Los conjuntos fundamentales de un aerogenerador son:

- **Torre:** Estructura de 80 / 100 metros que soporta todo el conjunto además de las fuerzas de empuje del viento. Estas pueden ser tubulares, de celosía o tronco-cónicas, siendo esta última la utilizada actualmente debido a su buen nivel de perturbación sonora y al impacto medioambiental.
- **Góndola o barquilla:** Conjunto que contiene todo el tren de transmisión y sus elementos auxiliares, situándose en la parte superior de la Torre. Esta transmite todos los esfuerzos y momentos generados por el rotor, Figura 2.7.
  - Parte Interior
    - Eje principal: Elemento de transmisión de energía rotacional en baja velocidad
    - Multiplicador: Transmite el movimiento giratorio del eje principal aumentando las revoluciones
    - Generador eléctrico: El objetivo principal de este elemento es transformar la energía mecánica del rotor en energía eléctrica.
    - Transformador: Eleva la tensión de salida del generador a la tensión de la red de distribución interna del parque que une todos los aerogeneradores hasta la estación.
  - Parte Exterior
    - Anemómetro y veleta para la medición del viento. Estos elementos están en redundancia.

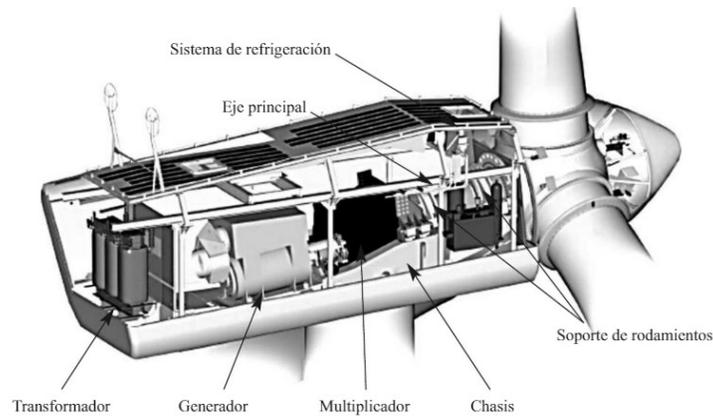


Figura 2-7. Interior de una góndola

- Rotor:

- Buje: Elemento que sostiene las palas y recibe todo el empuje del viento transformando por consiguiente la energía cinética en rotación. Actualmente, la velocidad de rotación no supera los 15 rpm, dependiendo del modelo del aerogenerador y de los equipos que lo constituyen.
- Palas: Esta consiste en dos valvas fabricadas de materiales ligeros como una mezcla de fibra de vidrio reforzada con resina epoxy unidas a una estructura interna del soporte. Este elemento se diseña para aprovechar lo máximo posible la energía del viento y minizar el ruido.

Generalmente la pala comienza con una sección circular de acoplamiento en la raíz y aumenta de tamaño hasta que cambia hacia un perfil delgado. Asimismo, las palas incorporan en su estructuras pararrayos que derivan a tierra las posibles descargas eléctricas.

- Sistemas auxiliares:

- Sistema de giro: Permite la rotación de la góndola con respecto a la torre. Esta formado por una serie de rodamientos planos y una corona dentada solidaria a la torre
- Sistema de frenado: Un aerogenerador frena gracias a la posición de las palas en bandera, contrabandera o mediante la rotura aerodinámica de la mismas.
- Sistema de refrigeración: Cuando la temperatura de la góndola supera el umbral recomendado se activa un sistema de refrigeración general formado por ventiladores. Además, los elementos principales del sistema siempre van equipados con un sistema propio de refrigeración. Por otro lado, existen intercambiadores de calor para elementos electrónicos.
- Sistema de protección: Protección de incendios (detectores de humos y exintores) y pararrayos
- Regulación de potencia: Controla tanto la velocidad de rotación como el par motor, amortiguando por consiguiente las fluctuaciones producidas por la velocidad del viento y evitando que se superen los parámetros de diseño.
- Sistema de control y monitorización

## 2.2. Análisis de la situación de mercado

A continuación, se va a realizar un análisis de la situación actual de los diferentes proyectos en relación con el presente documento. Para ello, primero de todo se debe investigar en diferentes estudios, el estado inicial del proyecto, así como las propuestas mejoras de los sistemas implicados. Los siguientes artículos y estudios se han obtenido a partir de la base de datos de la *Universidad de Sevilla* y de la base de datos de *Scopus*.

### 2.2.1. Documentos Asociados

#### 1. *Renewable Energy for Aviation: Practical applications to achieve carbon reductions and cost savings.* [4]

Todos los aeropuertos necesitan grandes cantidades de energía para transportar personas y mercancías de manera eficiente por todo el mundo. Esta energía normalmente se obtiene a partir de una amplia red de líneas de transmisión que se alimenta en mayor medida de recursos fósiles para su obtención.

Debido al gran impacto económico, tanto para la población como para la aviación, Estados Unidos ha realizado un estudio para determinar qué supone el consumo de energía en los aeropuertos y el coste de este, confirmado, por consiguiente, que el uso de energía es el segundo aspecto con mayor coste después del coste del personal.

Un aspecto para tener en cuenta son todas las emisiones en los desplazamientos nacionales e internacionales y las diferentes operaciones aeroportuarias. Se define que, aquellas actividades que se realizaran en el ámbito nacional están bajo la autoridad de cada Estado Miembro, por lo que las emisiones de los vuelos internacionales son responsabilidad de la Organización de Aviación Civil Internacional (*OACI*).

Debido al gran coste acarreado por el precio de la energía (el cual sigue en alza batiendo records históricos), muchos aeropuertos han puesto la mirada en el desarrollo de las energías renovables en las instalaciones aeroportuarias, así proporcionando un ejemplo del uso eficaz de las mismas y verificando que esta nueva forma de obtener energía puede implantarse con éxito en todos los aeropuertos del mundo. En algunos de estos aeropuertos se han desarrollado este tipo de proyectos no solo para beneficiarse de la energía que produce, sino también para el progreso y la innovación del país.

En el gran la crisis medioambiental que se vive en el presente, los Miembros Estados de la *OACI* y todos sus aeropuertos tienen el objetivo de reducir drásticamente las emisiones de CO<sub>2</sub> en un plazo corto de tiempo. El objetivo de este estudio engloba a numerosas organizaciones entre las que destacan [4]:

- *OACI*: Organismo que facilita el trabajo a los Estados Miembros en el desarrollo de los estándares, las prácticas recomendadas y la guía de reducción de las emisiones del CO<sub>2</sub> a nivel internacional (Asegurándose de la implementación de los proyectos asociados). Además, los Estados Miembros han adoptado objetivos ambiciosos para mejorar la eficiencia del combustible en un 2% anual y lograr un crecimiento neutro en carbono a partir de 2020. Consecuentemente, esta Organización ha desarrollado el “*Doc. 9988 Orientación sobre la elaboración de planes de acción de los Estados para actividades de reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>*” por el que desarrolla un plan de acción para la reducción de las emisiones de gases nocivos en el ámbito aeronáutico.
- *Autoridad Aeroportuaria*: Organismo encargado del desarrollo e implementación de programas ambientales para la contribución del Plan de Acción propuesta por la *OACI*. Asimismo, este organismo debe entender los tipos de tecnologías que pueden ser que pueden desplegarse en aeropuertos encargados, aprendiendo sobre todo de otras iniciativas y la financiación de esta.
- *Autoridad de Aviación Civil*: Organismo responsable de la implementación de la política y procedimientos procedentes de los acuerdos internacionales para la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>. A parte tiene permiso para participar en el programa de asistencia técnica para el desarrollo del proyecto.

- Socios de los Aeropuertos: Tener una empresa energética que ayuda a diseñar y desarrollar un proyecto de energía renovable puede suponer un papel central y único en el desarrollo, las operaciones y el mantenimiento del proyecto. Así mismo las aerolíneas también están interesadas en el desarrollo del aeropuerto

Realizando un análisis, los organismos anteriores caracterizaron 4 oportunidades para convertir fuentes de energía de los aeropuertos a las energías renovables:

- Electricidad in-situ
- Electrificación de las puertas
- Los equipos de apoyo terrestre (GSE)
- Calefacción y refrigeración

Las tecnologías de generación de electricidad más capaces de abastecer la demanda eléctrica en un aeropuerto debido al avance de la tecnología son:

- o Energía Fotovoltaica:

La principal desventaja de la energía solar fotovoltaica es que sólo genera electricidad durante el día, por lo que es incapaz de generar electricidad durante muchas horas consecutivas de la noche. Para una red eléctrica que debe mantener un suministro estable de electricidad, hay que activar una fuente alternativa para suplir este déficit. Aun teniendo esta desventaja, los paneles fotovoltaicos son muy compatibles con los aeropuertos debido a la integridad con las instalaciones.

Para garantizar que los proyectos no producirán un impacto de deslumbramiento, los solicitantes deben evaluar el potencial de un impedimento visual para los controladores de tráfico aéreo, los pilotos y cualquier otro receptor sensible en o cerca de la propiedad del aeropuerto del aeropuerto como parte de la ubicación del proyecto. Los proyectos deben seguir las normas estatales adecuadas para evaluar las cuestiones de seguridad asociadas a los proyectos fotovoltaicos, incluido el documento 9184 de la *OACI*, “*Manual de Planificación Aeroportuaria, Parte 1*”.

La Administración Federal de Aviación de los Estados Unidos (*FAA*) dispone de un programa (*US Federal Aviation Administration’s Solar Glare Hazard Analysis Tool (SGHAT)*) que permite estudiar el deslumbramiento que produce las placas solares en instalaciones Aeroportuarias.

- o Energía Eólica:

Para que la energía eólica sea económica, el viento debe ser comparativamente fuerte y constante. La cantidad de energía producida por el viento aumenta exponencialmente con la velocidad del viento, lo que significa que cada aumento del viento convertido en energía supone un aumento "al cubo".

Dada la necesidad de construir estructuras altas para captar suficiente cantidad de viento, los aerogeneradores no son propicias para su uso en aeropuertos, ya que pueden producir impacto físico en el espacio aéreo asociado al aeropuerto. A pesar de la necesidad de tamaño y como alternativa, varios aeropuertos han construido turbinas eólicas integradas en los edificios. Los diseños de diseños suelen incluir la colocación de 10 a 20 aerogeneradores de pequeña escala en las instalaciones del aeropuerto

## **2. *Doc 9988 Orientación sobre la elaboración de planes de acción de los Estados para actividades de reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>* [5]**

La Asamblea de la *OACI* celebrada del 27 de septiembre al 7 de octubre de 2016 adoptó la Resolución A39-2: *Declaración consolidada de las políticas y prácticas permanentes de la OACI a la protección del medio ambiente – Cambio climático* para limitar o reducir las emisiones que contribuyen al cambio climático mundial. Un elemento fundamental de esta resolución consiste en que los Estados preparen y presenten voluntariamente a la *OACI* un plan de acción para tratar de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en la aviación civil internacional.

Antes las necesidades de asistencia de los Estados para la preparación de los planes de acción, la *OACI* confecciona este documento cuyo objetivo es mejorar la presentación de informes sobre emisiones de CO<sub>2</sub> y

la implementación de proyectos de mitigación para la aviación civil internacional.

Los planes de acción deben incluir información sobre las actividades que tienen por objeto hacer frente a las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de la aviación internacional, con inclusión de acciones nacionales, y actividades implantadas a nivel regional o mundial. Estos deben poseer:

- *Información de contacto*
- *Línea base del consumo de combustible, las emisiones de CO<sub>2</sub> y el tránsito:* A parte de incluirlo en el plan de acción, la *OACI* exige a los Estados a notificar anualmente el consumo de combustible y tránsito. Para definir la línea base se debe seguir los siguientes pasos:
  - Definir el horizonte cronológico y los años intermedios
  - Estimar los datos históricos de actividad e inventario de emisiones
  - Elaborar pronósticos de actividad del transporte aéreo y las emisiones conexas en el escenario base (*El Manual de previsión del tráfico aéreo (Doc 8991) OACI* ofrece orientación.
- *Medidas para mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub>:* El conjunto de medidas se clasifica según las siguientes categorías:
  - Tecnología y normas (Ej. Reconversiones, actualizaciones o adquisición de aeronaves)
  - Combustible de aviación sostenible
  - Mejoras operacionales (Cambios en los procedimientos de la gestión del tránsito aéreo, mejoras de infraestructuras y de operaciones)
  - Medidas basadas en criterios de mercado (derechos o impuestos para hacer frente a las emisiones, compensación de carbono)
- *Resultados previstos*
- *Necesidades de asistencia*

Estos planes de acción debían entregarse para finales de junio de 2018 y luego, una vez cada tres años, sin embargo, puede estar sujeta a plazos diferentes a consideración de la organización, ya que la misma suele prestar asistencia a los Estados desarrollando y divulgando herramientas en materia de aviación y medio ambiente.

Para calcular las emisiones de CO<sub>2</sub> a partir del consumo de combustible, la *OACI* ha definido los siguientes pasos:

- Pasar el combustible consumido de volumen (litros) a masa (kg). Si se conoce la densidad promedio del combustible utilizar ese dato, si no suponer un factor de conversión de 0,8 kg/litros
- Para convertir la masa de combustible en masa de emisiones de CO<sub>2</sub> se utiliza un factor de 3.16 kg CO<sub>2</sub>/kg combustible.

### **3. La descarbonización en el sector aeronáutico [6]**

La contaminación medioambiental se ha convertido en uno de los grandes problemas a nivel mundial. En España el sector de transporte en el año 2016 representó un valor de 25% del total de emisiones de CO<sub>2</sub>, de las cuales el 60% fueron provocadas por el turismo. En este sentido, la Unión Europea ha declarado la emergencia climática para revertir este efecto emitiendo la orden de una reducción del 40% de los gases emitidos de los vehículos de transporte entre 2020 y 2030.

La aviación civil emite entre 3 y el 5% del CO<sub>2</sub> a nivel mundial, lo cual supone 900.000 millones de toneladas de este gas a la atmósfera. Además de las emisiones generadas por los vuelos, existe emisiones provocadas por la actividad aeroportuarias, es decir, emisiones adyacentes que surgen de la relación del tráfico de pasajeros, comercio e infraestructuras. Las previsiones para el 2040 se triplicarán, lo cual significará que este sistema de transporte sea todavía más contaminante que las centrales térmicas

convencionales. Esto supone aspectos muy negativos para el medioambiente, ya que por cada tonelada de CO<sub>2</sub> contribuye al deshielo de 3 m<sup>2</sup> de hielo en el Ártico.

Para frenar este desastre mediambiental se están utilizando las energías renovables, un ejemplo de esta es la energía solar fotovoltaica. Por cada kWh generada mediante este tipo de energía se está evitando la emisión a la atmósfera de aproximadamente 1 kg de CO<sub>2</sub> en el caso de que se comparase con la producción de energía eléctrica generada a partir del carbón, o aproximadamente de 0,4 Kg de CO<sub>2</sub> en comparación con la producción de energía eléctrica con gas natural.

El objetivo principal de este proyecto es la reducción de las emisiones de gases nocivos a la atmósfera electrificando una flota de vehículos terrestres utilizados en los aeropuertos, colaborando por consiguiente en el proceso de descarbonización de la tierra. Para suministrar toda la cantidad de energía necesaria para los diferentes vehículos de su estudio, Montserrat propone realizar una instalación fotovoltaica en la cubierta de los hangares u otras naves para que el impacto visual sea el mínimo posible.

El autor utiliza la energía fotovoltaica debido a que el mantenimiento de los paneles es nulo o muy escaso, debido a su propia configuración, ya que no tienen partes móviles y las células y sus conexiones internas están en capsuladas en varias capas de material protector. No obstante, dada su instalación en una superficie articulable y a los elementos se deberá realizar una inspección general 1 ó 2 veces al año donde se asegurará que las conexiones entre paneles y al regulador estén bien ajustadas y libres de corrosión, se deberá comprobar también si los paneles se encuentran sucios y en caso de ser así se limpiaran.

Debido a las limitaciones geográficas que otorga el aeropuerto mediano del estudio, existe una diferencia en cuanto a la demanda de energía ya que el consumo es ligeramente mayor a la energía generada a partir de la placa fotovoltaica. La diferencia es del 10% de la energía, la cual se tiene que obtener mediante la red eléctrica nacional.

El proyecto posee alcanza una rentabilidad pasados los 10 primeros años, siendo claramente viable tanto económicamente como mediambientalmente.

#### **4. Estudio de las posibilidades de uso de energías renovables y construcción de una pista sobre el mar en un aeropuerto de tamaño mediano [7]**

En las últimas décadas, el consumo de energía y emisión de CO<sub>2</sub> ha crecido exponencialmente, la tendencia de la demanda energética sigue aumentando en la mayoría de las principales fuentes de energía, pero poco a poco las energías renovables van teniendo más protagonismo a lo largo de los años. Según la Agencia Internacional de Energía (siglas IEA, en inglés) existen 3 posibles escenarios con respecto a la relación de emisiones de gases nocivos y la demanda energética [8]

- *Política actual:* No tomar medidas preventiva y seguir actuando como en el presente
- *Nuevas políticas:* Introducir poco a poco las medidas sostenibles anunciadas por los gobiernos
- *Desarrollo sostenible:* Intentar llegar un equilibrio entre el desarrollo sostenible, el acceso de la energía, calidad del aire y sobre todo el cambio climático.

En la Figura 2-8, se muestra las predicciones futuras en relación con las emisiones de CO<sub>2</sub> en función de los tres escenarios anteriormente mencionados. En la parte derecha muestra como las emisiones de estos gases nocivos van a seguir aumentando pese a las diferentes medidas que se quieran realizar. Por otro lado, en la parte izquierda, se observa que el camino será largo y no se obtendrán resultados inmediatos.

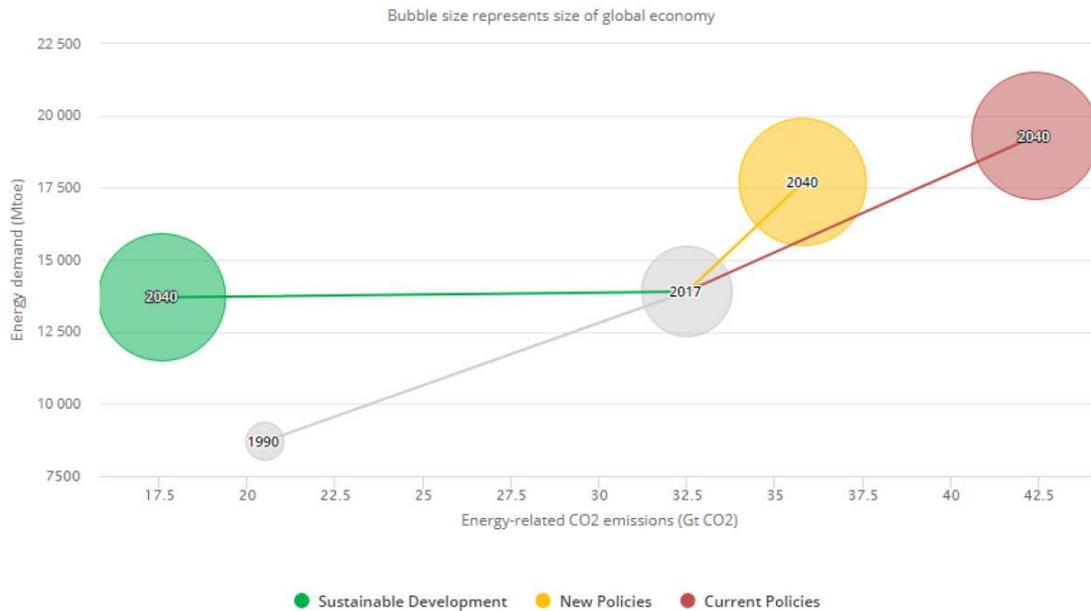


Figura 2-8. Relación de emisión de CO2 y la demanda energética

Una vez vistas los posibles escenarios que presenta EIA hay que conocer que cantidad de energía se consume. Analizando esto, se afirma que aproximadamente el 70% del consumo energético es de carácter residencial, comercial y de transporte, que son principalmente los sectores que engloban el sector aeronáutico.

Los aeropuertos son grandes consumidores de energía eléctrica, no obstante, es importante conocer donde se concentra más su consumo para posteriormente optar por la mejor solución. Hay que destacar que la distribución del consumo eléctrico no es igual en todos los aeropuertos puesto que no todos tienen la misma proporción de flujo de pasajeros, operaciones ni superficies de Terminal.

Se observa en la Figura 2-9 como existen dos sectores diferenciados en el aeropuerto: el lado aire y el lado tierra.

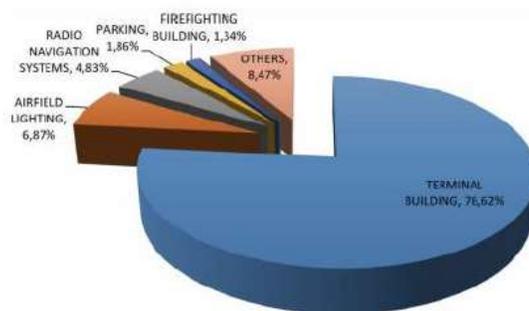


Figura 2-9. Consumo Eléctrico General de los Aeropuertos

El lado aire corresponde a la iluminación del aeródromo, los sistemas de radionavegación, la torres de control y los hangares. Este lado representa aproximadamente un 25% del consumo total de energía del aeropuerto y es variable en función de las horas que opere el aeropuerto, el tamaño de las áreas...

Por otro lado, el lado tierra proporciona servicios y facilidades al pasajero y procesa todo tipo de operaciones que relaciona al lado aire. Este lado consume el 75% del consumo de energía eléctrica. Es la parte del aeropuerto que más consume porque proporciona servicio a los pasajeros. La distribución de consumo eléctrico suele ser:

- Climatización → 25% del total del lado tierra
- Iluminación → 20 % del total del lado tierra
- Información y comunicación → 20% del total del lado tierra
- Compañías aéreas → 10 % del total del lado tierra

Como se intuye, la actividad humana en los aeropuertos sigue una tendencia ascende a lo largo de los años, por lo que se necesitará un consumo energético mayor. Se estima que para el año 2030, habrá un crecimiento de 1,4 millones de pasajeros, por lo que el Aeropuerto de Lanzarote consumirá 18.31 GWh. Esto supondría un aumento del 26.21% de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Ante el aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> y al aumento de la demanda energética de todos los aeropuertos y todas las instituciones desean implementar fuentes de energías renovables para disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> y reducir la huella medioambiental. Para ello, se estudian las tecnologías renovables de la Tabla 2-2.

Fuente de Energía	Puntos Positivos	Puntos Negativos
Solar	Espacio suficiente	Deslumbramiento
Eólica	Afluencia de viento	Limitación obstáculos
Hidroeléctrica	Útil para aeropuertos cercano de movimientos de agua	Impacto medioambiental por construcción de planta
Geotérmica	Gran cantidad terreno	Baja rentabilidad

Tabla 2-2. Listado de Energías Renovables en los Aeropuertos

Desde el punto de interés aeroportuario, la Energía Solar y Eólica son las más viables debido a las condiciones atmosféricas de la localización del Aeropuerto. Fuera de territorio español, los aeropuertos de Dubái y la India son dos de los aeropuertos más desarrollados en esta energía, hasta tal punto que el segundo de ellos, es el primer aeropuerto totalmente alimentado por energía solar.

##### 5. *Fully solar powered Doncaster Sheffield Airport: Energy evaluation, glare analysis and CO<sub>2</sub> mitigation.* [9]

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la viabilidad de una implementación de una planta fotovoltaica de 12 MWp en el Aeropuerto de Sheffield (Reino Unido), además de desarrollar un modelo matemático que permita comprobar el deslumbramiento de los paneles y posteriormente, esbozar métodos para evitar el efecto de este. Los autores utilizan un método de investigación cuantitativo basado en un enfoque deductivo para la obtención de resultados.

Las plantas fotovoltaicas han recibido una atención muy exhaustiva durante los últimos años debido a la sostenibilidad, a la reducción del CO<sub>2</sub> y sobre todo al elevado coste de los consumibles fósiles. Las células fotovoltaicas convierten la radiación del sol en electricidad de corriente continua debido a su alto poder de conversión eléctrica, menor emisión de carbono y disponibilidad de energía.

La implementación de esta novedosa técnica de obtención de energía puede suponer un riesgo para la seguridad ya que se pueden producir reflejos y deslumbramientos, riesgos importantes para los pilotos y los controladores aéreos difíciles de predecir con exactitud. La principal herramienta para eliminar este efecto es la conocida "Solar Glare Hazard Analysis Tool". Este software permite simular los ángulos de

deslumbramiento e identifica la inclinación recomendada para los módulos fotovoltaicos.

Un estudio realizado por Sukumaran y Sudhakar sobre la implementación de energías renovables en el aeropuerto de Cochin reveló que se podría generar más del 25% de la energía total del aeropuerto y también ahorraría unas 220 toneladas de emisiones de carbono al año. La viabilidad de la implantación de un modelo de energía renovable depende de la capacidad de pasajeros de pasajeros y del tráfico del aeropuerto. Otra investigación realizada por Elgun y Shahrabi exploró la tendencia mensual del consumo eléctrico de grandes aeropuerto, donde estableció una relación directamente proporcional entre el tráfico de pasajeros y el consumo eléctrico. Por último, un estudio realizado por Mueller et al. afirma que la superficie necesaria para una planta de energía solar de 1 MW suele ser de 9.290,30 metros cuadrados, por lo que la planta propuesta de 12 MWp necesitaría un mínimo de 111.483,65 metros cuadrados [10]

Antes de realizar la propia implantación, se debe realizar un análisis previo para determinar el espacio de la planta fotovoltaica, que puede depender de la capacidad de esta y de la energía necesaria para su uso (por ejemplo, la energía necesaria en el propio aeropuerto). Por otro lado, hay que estudiar cual va a ser el terreno en el que se va a implementar la planta ya que debe poseer la menor zona de sombra durante el día y considerar las distancias de seguridad con respecto a la pista de aterrizaje. Para ello, se puede utilizar la aplicación gratuita *SISIFO*

Por consiguiente, los módulos fotovoltaicos utilizados para el estudio son los módulos estándares que contiene un apilado de capas de forma que se minimiza los efectos de deslumbramiento ya que la superficie externa del propio panel está fabricada de vidrio que posee una alta transmisividad y una mínima reflectancia, punto a favor en el ámbito aeronáutico. En la Tabla 2-3 se puede observar algunos parámetros clave en el establecimiento de los paneles.

Para estar seguro de que los paneles utilizados en el Aeropuerto de Sheffield no supusieran un riesgo para la seguridad, los autores del artículo crearon un modelo matemático para prevenir el deslumbramiento que se basa en las leyes de la reflexión. Establecen que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión e igual al ángulo de reflexión. Por lo que se utilizan las siguientes reglas para evitar los efectos del deslumbramiento:

- Los ángulos en una línea recta suman 180°
- La suma de todos los ángulos de un triángulo suma 180°
- Los ángulos correspondientes son iguales
- Los ángulos verticalmente opuestos donde se cruzan dos rectas son iguales

Parameter	Specification
<b>Model of PV</b>	CS3W-400
<b>Peak watt rating (W)</b>	400
<b>Short circuit current (A)</b>	10.90
<b>Open circuit voltaje (V)</b>	47.20
<b>Energy efficiency (%)</b>	18.11
<b>Operating temperatura (°C)</b>	-40 to +85
<b>Power output (kW)</b>	1760
<b>DC input (V)</b>	570 to 950
<b>Inverter efficiency (%)</b>	98.60

Tabla 2-3. Especificaciones del módulo solar e inverteor

**6. Making Indian Airports sustainable by using solar photovoltaic system: analysis of three airports. [11]**

El consumo de energía eléctrica generada por combustibles fósiles puede reducirse drásticamente mediante la implementación de sistemas de energía renovables. No solo puede reducirse las emisiones de carbono del sector de transporte, sino que también aportará sostenibilidad y viabilidad económica al sector.

Varios investigadores han trabajado sobre la instalación de una planta solar fotovoltaica en los aeropuertos. El análisis de la literatura de estos autores reveló la posibilidad de instalar sistemas solares fotovoltaicos en los aeropuertos, dando por consiguiente al estudio que se presenta. En este estudio se propone un diseño detallado y un análisis de viabilidad de tres plantas de energía solar fotovoltaica situadas en las inmediaciones de tres aeropuertos de India sin afectar al correcto funcionamiento del aeropuerto.

Para determinar el espacio entre dos filas en un conjunto de paneles fotovoltaicos de varias filas y así eliminar la sombra que puede proporcionarnos la fila anterior se usa trigonometría básica.

El ángulo de perfil del haz de radiación solar en un plano del módulo fotovoltaico con un ángulo acimutal de la superficie de  $\gamma$  también es necesario para el análisis del sombreado. El ángulo de perfil es la proyección del ángulo de altitud solar sobre un plano vertical perpendicular al módulo fotovoltaico considerado. La Figura 2-10 muestra el ángulo de perfil y el ángulo de altitud solar para un módulo fotovoltaico con un ángulo acimutal superficial de  $\gamma$ .

Aquí, el ángulo  $rmn$  es el ángulo de perfil ( $\alpha_p$ ) y el ángulo EAD es el ángulo de altitud solar ( $\alpha_s$ ). El ángulo del perfil se determina utilizando la Ecuación 2-1 donde  $\gamma_s$  es el ángulo acimutal solar,  $\gamma$  es ángulo acimutal de la superficie y  $\beta$  es el ángulo de inclinación.

$$\tan \alpha_p = \frac{\tan \alpha_s}{\cos(\gamma_s - \gamma)}$$

Ecuación 2-2. Cálculo del ángulo del perfil

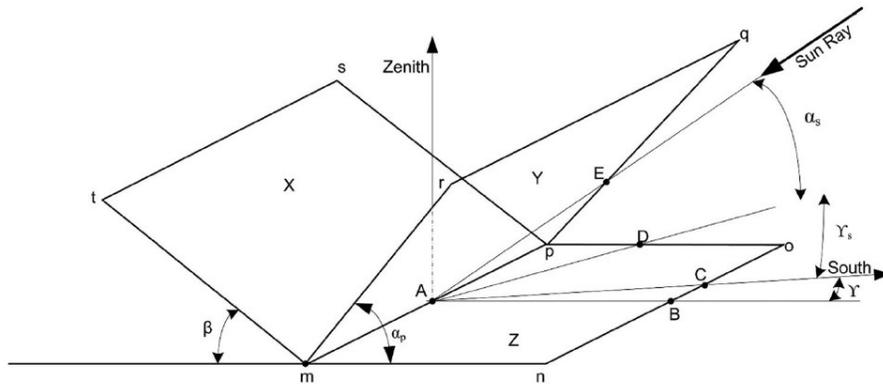


Figura 2-10. Ángulo de perfil y de altitud solar para PV con ángulo acimutal

En la Figura 2-11 se muestra la sección de dos filas de conjuntos de módulos fotovoltaicos. Mientras el ángulo del perfil sea mayor que el ángulo PTQ, ningún punto del Módulo FV 2 será sombreado por el Módulo FV 1. Si el ángulo del perfil es PT'Q' y es menor que PTQ, la parte del Módulo FV 2 situada por debajo del punto T' estará sombreada por la radiación del rayo solar.

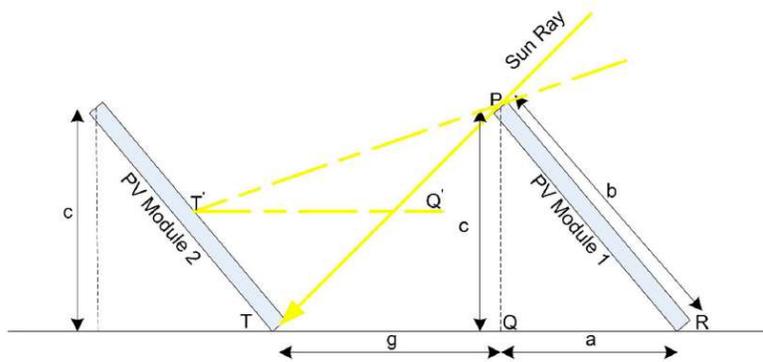


Figura 2-11 . Sección de dos filas del conjunto de módulos fotovoltaicos

Por otro lado, para determinar la distancia entre dos filas para evitar el sombreado se necesitan los siguientes ángulos:

- Ángulo de latitud
- Ángulo acimutal solar y ángulo de altitud solar: Se obtienen de la carta solar de la latitud del aeropuerto en cuestión. Hay que tener en cuenta que la posición del sol cambia con las estaciones y en el solsticio de invierno es el instante en el que el ángulo de altitud solar es el más bajo.

Para calcular el valor de “c” se utiliza la Ecuación 2-2.

$$c = \text{sen}(\beta) \cdot \text{longitud del módulo } FV$$

Ecuación 2-3. Cálculo del valor c

En el caso de estar en el solsticio de invierno, los rayos de sol forman un triángulo vertical como se puede observar en la Figura 2-12. Por lo tanto, el valor de la sombra “e” se obtiene utilizando el ángulo de altitud solar y el valor de la cuerda calculada anteriormente mediante la Ecuación 2-3

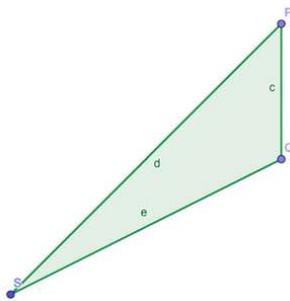


Figura 2-12. Triángulo para calcular la longitud máxima de la sombra del módulo.

$$e = \frac{c}{\tan \alpha_s}$$

Ecuación 2-4. Calculo del valor e

Por consiguiente, el valor de “g” es la distancia mínima entre dos módulos para eliminar la sombra, Ecuación 2-4.

$$\angle TSQ = 90 - \gamma_s$$

$$g = \text{sin}(\angle TSQ) \cdot e$$

Ecuación 2-5. Calculo del valor de g

Así mismo, para determinar el rendimiento de una planta de energía solar fotovoltaica se utiliza el coeficiente de rendimiento. Este parámetro se calcula a partir de la Ecuación 2-5:

$$\text{Performance ratio} = \frac{\xi/\psi_0}{I/I_0}$$

Ecuación 2-6. Cálculo del Coeficiente de Rendimiento

Siendo  $\psi_0$  la potencia nominal de salida del sistema (kW), I la irradiación solar real (kWh/m<sup>2</sup>), I<sub>0</sub> la irradiación de referencia del conjunto (1kW/m<sup>2</sup>) y  $\xi$  la salida neta de energía eléctrica AC de los inversores (kWh)

Para concluir, la metodología que sigue el trabajo se enfoca en 4 pasos, Figura 2-13:

1. Recolección de los datos del aeropuerto
2. Diseño de las centrales solares fotovoltaicas
  - 2.1. Análisis de sombra
  - 2.2. Pérdidas del sistema
3. Rendimiento de las plantas mediante análisis de coste
4. Estimación de la reducción de CO<sub>2</sub>

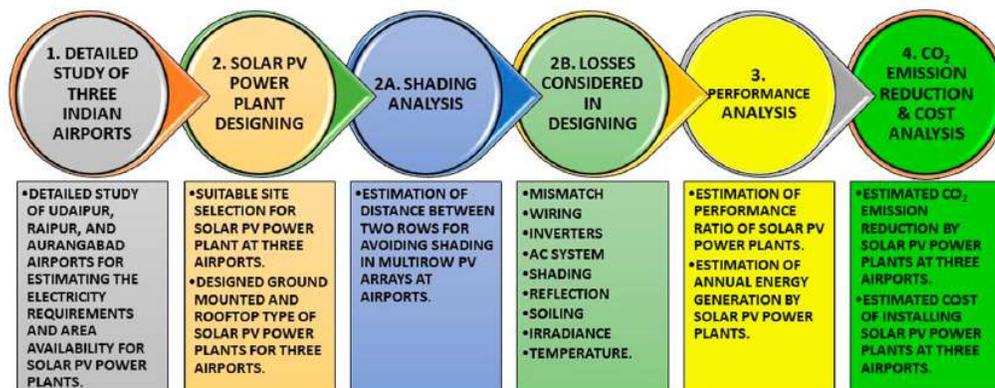


Figura 2-13. Diagrama de flujo que muestra la metodología adoptada por el autor

## 7. Estudio de la Implementación de Energía Fotovoltaica en el Aeropuerto de Sevilla. [12]

En la actualidad, existe una gran preocupación por el cambio climático, por lo que existe una constante búsqueda de aquellos recursos renovables. La aviación, y sobre todo en los aeropuertos, consumen una gran cantidad de energía, por lo que la Unión Europea quiere reducir un 20% la energía obtenida a partir de recursos fósiles en todos los Aeropuertos Europeos.

En este proyecto se recoge el diseño de una instalación fotovoltaica para el Aeropuerto de Sevilla para satisfacer la necesidad de la Unión Europea sobre el consumo eléctrico. Para ello, el terreno escogido para la incorporación de la planta fotovoltaica es un área próxima al aeropuerto de extensión 5 hectáreas. El conjunto de placas proporcionará energía a la central eléctrica del aeropuerto, la cual actualmente tiene tres posibles alimentaciones (línea primaria, secundaria y grupos de electrógenos).

La energía total consumida por el Aeropuerto de Sevilla según este proyecto es de 14.000.000 kWh por lo que al menos 3.000.000 kWh tiene que obtenerse a partir de energía renovable según los requisitos enunciado anteriormente. Tras realizar una serie de cálculos entre los que destacan el cálculo de la potencia de la planta fotovoltaica en función de los diferentes meses y la determinación de la potencia del inversor, se ha podido realizar una elección tanto del módulo como el inversor fotovoltaico (además de realizar un estudio según el rendimiento y el coste asociado de cada uno).

El módulo fotovoltaico escogido por el autor es el módulo AC-340M de Axitec con una inclinación de

35 °, ya que es el que mejor cumple los requisitos del consumo eléctrico necesario. En cuanto al inversor se ha escogido *PVS800-57-0250KW* de *ABB* ya que posee buenas especificaciones a un precio económico.

La configuración de la instalación se ha estudiado el número máximo/mínimo de módulos en serie y el número de módulos en paralelo, por lo que la configuración final de la instalación es de 52 cadenas de 17 módulos en serie conectadas en paralelo para cada inversor. Por lo que supone un total de 884 módulos por cada inversor, Figura 2-14

La configuración de la matriz de módulos se divide en 6 inversores (impuesto por el autor) las cuales todas poseen las mismas características. En total este estudio tiene 5304 módulos fotovoltaicos con una potencia de pico total de 1.803.360 kWp (potencia promedio de los meses). Esto supone una superficie total de 2,5 hectareas (incluyendo la separación entre ellos).

Una vez definido todo lo anterior, se realiza un estudio mensual sobre la energía producida a lo largo de cada mes para confirmar que se cumplen con los requisitos de la UE, Tabla 2-4.

Por otro lado, se afirma que el proyecto se hace rentable a partir de los 12 años de funcionamiento, por lo que se convierte en un gran incentivo para el fomento de las energías renovables. Se comenta que el estudio realizado tiene una extensión de 25 años, por lo que se calcula los beneficios obtenidos, los cuales superan casi los 9.000.000 €. Este beneficio es muy muy optimista ya que ha considera que la subida del precio de la luz evoluciona de forma lineal junto al IPC.

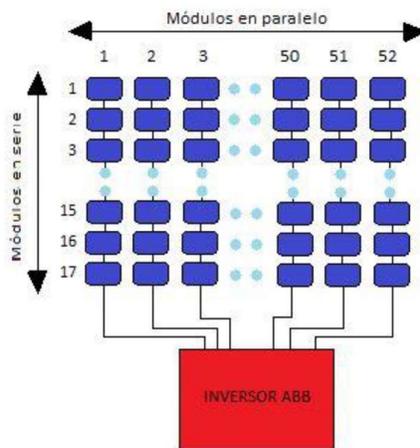


Figura 2-14. Configuración de un subcampo fotovoltaico.

Mes	Energía producida [kWh/mes]
Enero	201.769,57
Febrero	218.564,36
Marzo	273.593,28
Abril	263.761,90
Mayo	280.531,18
Junio	277.770,44
Julio	295.726,63
Agosto	295.877,02
Septiembre	261.366,97
Octubre	252.091,09
Noviembre	207.572,11
Diciembre	191.389,46
<b>Total</b>	<b>3.020.014,02</b>

Tabla 2-4. Energía producida a lo largo de cada mes

#### 8. *Condicionantes para la Implementación de Energías Eólica en Instalaciones Aeroportuarias.* [13]

Los aeropuertos son centros cuyas instalaciones demandan gran cantidad de recursos naturales entre los que destacan el agua y la energía debido a la gran afluencia y el tamaño de este. La disponibilidad de la energía eléctrica, la seguridad de su suministro a un coste razonable y su producción sostenible, son uno de los temas de interés de los gestores aeroportuarios. Pone en manifiesto debido al interés tanto ambiental como económico el uso de las tecnologías de energías renovables ya que presentan una alternativa económica y “eco-friendly”.

Debido a la necesidad del uso de estas nuevas tecnologías limpias, la energía eólica está creciendo de forma exponencial batiendo todos los récords, demostrando que las energías renovables pueden contribuir a la transformación del modelo energético tradicional. La implementación de esta en principio puede verse incompatible debido a la necesidad de zonas libre de obstáculos para la operación segura de las aeronaves. Sin embargo, gracias a este estudio realizado por Sergio Ortega, se expondrán una serie de condiciones para la implementación de esta energía renovable en las instalaciones aeroportuarias. Para la realización del artículo, se ha fijado el Aeropuerto como Clave 4 y con aproximación por precisión (clasificación de la *OACI*).

##### 1) Elección del emplazamiento

La elección del emplazamiento de los aerogeneradores en las instalaciones aeroportuarias es uno de los parámetros más importantes debido a la seguridad de todas las operaciones aeroportuarias. En el Anexo 14 de la *OACI* describe las superficies limitadoras de altura y emplazamiento de los obstáculos (servidumbres físicas y radioeléctricas).

- Servidumbre física: Establece áreas y las distancias de seguridad en relación con la pista de aterrizaje que debe cumplir la instalación de energía eólica.
- Servidumbre Aeronáutica Radioeléctricas: Se producen algunas interferencias electromagnéticas debido a que se colocan objetos cerca de equipos radioeléctricas que bloquean o atenúan las señales. Las turbinas eólicas pueden causar diferentes efectos como retornos falsos de señal, pérdidas de sensibilidad del receptor, sombras de señal y saturación de receptor. Si se tiene más de un aerogenerador, el efecto negativo se acumula. Es por ello que se especifica según normativa la distancia de seguridad entre los aerogeneradores y los diferentes sistema de radionavegación.
- Metodología de elección de emplazamiento: La elección del emplazamiento debe comenzar mediante un análisis del mapa de servidumbre del propio aeropuerto para estudiar la colocación de los aerogeneradores (los cuales deben ubicarse dentro de la superficie horizontal del aeropuerto cumpliendo todas las distancias de seguridad).

El número de aerogeneradores se especificará según el terreno disponible para colocarlos en fila perpendicular al viento predominante separados entre ellos unos tres diámetros del rotor. (Debido a esto, no se podrá instalar más de 2-3 generadores en el aeropuerto).

Por último, se debe realizar un estudio de seguridad operacional y un estudio radioeléctrico que garantice que la instalación no suponga un peligro para las operaciones de las aeronaves.

## 2) Características del aerogenerador

En el caso de instalaciones aeroportuarias, el factor limitante de los aerogeneradores es la altura, la cual debe ser menor a 45 metros para que el conjunto no vulnere la superficie horizontal interna. En líneas generales, la altura de la torre suele ser igual al diámetro del rotor ya que la altura final es un compromiso entre el coste y la mayor energía que se puede extraer del viento. Supone por lo tanto que la torre sea de 30 metros y el radio de la pala sea de 15 metros. La potencia eólica se calcula mediante la Ecuación 2-6.

$$P = \frac{\rho A C_p V^2}{2}$$

Ecuación 2-7. Cálculo de la Potencia Eólica

Siendo:

P = Potencia en W

$\rho$  = Densidad del Aire

A = Superficie ortonormal atravesada por el viento, en  $m^2$ .

V = Velocidad del viento en m/s

$C_p$  = Coeficiente de potencia eólica

Para una velocidad nominal estándar de 13 m/s, y considerando un rango de coeficiente que se utiliza en la práctica actualmente, se tiene que para el aerogenerador definido anteriormente puede proporcionar una potencia nominal entre 285-428 kW en función del  $C_p$

## 3) Recurso eólico

- Evaluación del Recurso Eólico: El objetivo principal es maximizar la captación de energía para la reducción en el coste de producción, para ello se deberá realizar un estudio de los recursos eólicos disponibles y el aprovechamiento de estos.
- Orientación del Aerogenerador: La configuración más factible es que el rotor se coloque

perpendicular a la pista orientado hacia la dirección del viento predominante.

- Variación de la velocidad del viento con la altura: Un emplazamiento favorable para la instalación de aerogeneradores es si el recurso eólico disponible es bueno. Se entiende recurso eólico como la calidad que posee el viento, es decir, si existen turbulencias o si el desplazamiento del aire es correcto.
- Energía producida en función del recurso eólico: En función de los parámetros definidos en el apartado anterior, la energía que se puede producir varía entre 0,5 GWh y 1,33 GWh por aerogenerador, en función de un factor de capacidad

#### 4) Generador eléctrico

En todos los aeropuertos existen una fuente de energía externa de alimentación o primaria y una fuente interna de autogeneración o secundaria. Las opciones existentes en relación con la generación eléctrica procedente de una instalación de energía eólica en un aeropuerto son varias:

- Uso como fuente primaria: No viable
- Uso como fuente secundaria: No fiable debido a la alta fiabilidad de las redes suministradas
- Venta de energía producida a la red: Factible, pero puede peligrar la viabilidad económica del proyecto
- Uso como fuente primaria sincronizada con la red y venta de la energía sobrante: Opción más factible para el proyecto

#### 5) Señalamiento e iluminación

Los álabes del rotor, la góndola y el mástil de soporte de las turbinas eólicas deben pintarse de color blanco, excepto que se especifique en caso particular en el manual. Las palas del rotor deben contener bandas de color rojo o anaranjado, en número de 2 por pala y con una longitud de  $1/7$  del radio de la pala, separadas también entre sí una distancia de  $1/7$  del radio de la pala, Figura 2-15 (Izquierda)

La iluminación se debe instalar en todos los casos en la parte superior de la góndola del aerogenerador de manera que las aeronaves que se aproximen desde cualquier dirección tengan una vista sin obstrucciones, Figura 2-15 (Derecha)

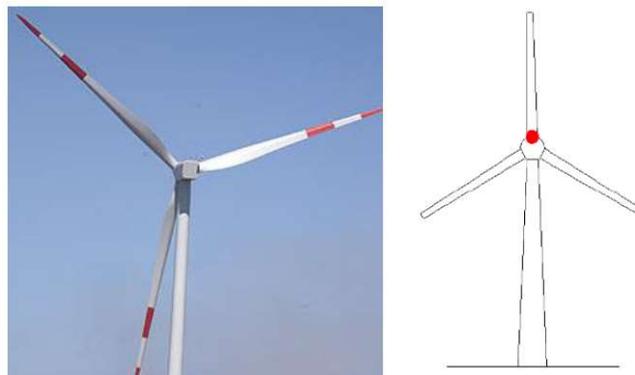


Figura 2-15. Señalamiento y Balizamiento de un Aerogenerador en Aeropuerto

Para asegurar la fiabilidad de los sistemas de iluminación instalados dichos sistemas deben disponer de un dispositivo monitor remoto de aviso de alarma en caso de fallo y deben disponer de una fuente de energía secundaria que asegure el funcionamiento de la iluminación al menos en las 12 horas siguientes desde que se produce el fallo en la alimentación principal [13]

## 6) Condicionantes Económicos

La principal inversión económica es la propia implementación de la instalación eólica y los sistemas asociados. Por otro lado, los costes de mantenimiento son pequeños en comparación a la inversión principal.

La instalación de energía eólica en aeropuertos es un campo de trabajo con mucho potencial en un futuro próximo debido la mayor preocupación existente por la sostenibilidad medioambiental y la necesidad de ahorrar de costes en materia de energía, enlazando con otras posibles líneas de investigación como son la energía mini-eólica y la posibilidad de combinar un mix de energías renovables para lograr aeropuertos auto suficientes energéticamente [13]

### **9. *Energy Harvesting on Airport Pavements: State-of-the-Art* [14]**

La capacidad de conectar regiones remotas y la duración del viaje convierte a la aviación es uno de los mejores medio de transporte hoy en día. Sin embargo, estos desplazamientos repercuten en la producción de gases invernadero. Surge por lo tanto la necesidad de utilizar una nueva tecnología de recolección de energía. En este documento se analiza la posibilidad de desarrollar una tecnología hidráulica/mecánica en los pavimentos de los aeropuertos que generará energía eléctrica en función del movimiento de los aviones.

La energía solar y eólica son funetes de energía inciertas, ya que varían a lo largo del día y de la ubicación geográfica. Sin embargo, la energía cinética proporcionada por el movimiento de los aviones puede convertirse en energía eléctrica que se utilizará en el propio aeropuerto, basándose en una aplicación en el pavimento del aeropuerto.

Los pavimento para aeropuertos no son fundamentalmente diferentes de los pavimentos para carreteras. La diferencia se basa en el tipo de sistema de transporte, ya que las aeronaves necesitan requisitos técnicas diferentes. Este pavimento está sometido a menos repeticiones de carga, pero la carga de las ruedas y la presión de los neumáticos son mucho mayores.

Para la generación de energía en los pavimentos existen dos formas distintas. La primera de ella, cuyo proceso es más sencillo, es el proceso piezoeléctrico, es decir, la compresión del material generará electricidad a partir de un generador piezoeléctrico. Por otro lado, esta generación energética puede captarse de manera indirecta, es decir, mediante dispositivos hidráulicos, neumáticos, electromecánicos o microelectromecánico (MEMS) se produce energía a partir de un generador electromecánico. Dadas las condiciones de los pavimentos de los aeropuertos, no todas estas tecnologías son susceptibles a ser aplicadas, solo la tecnología piezoeléctrica e hidráulica pueden implementarse en los aeropuertos.

El material piezoeléctrico puede producir electricidad cuando se somete a una tensión capaz de deformar su geometría. Su constitución puede clasificarse según el material usado entre los que se destacan: material monocristalino, piezocerámica, semiconductores piezoeléctricos, polímeros, compuestos piezoeléctricos y vitrocerámicas; siendo los más comunes los polímeros y las cerámicas. En cuanto a los diseños todos los diseños existente, los más utilizados para la captación de energía son el platillo y el puente. Moure et al. [14] [15]

El interés de las energía renovables está aumentando de forma exponencial debido a la concienciación de los organismos a la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> así como el gran impacto económico que supone el uso de la electricidad ya que subida del precio de la luz evoluciona de forma lineal junto al IPC. Lo mismo ocurre en las instalaciones aeroportuarias, el aumento de los gases nocivos y la demanda energética todas las instituciones desean implementar fuentes de energías renovables para reducir la huella medioambiental.

En la Figura 2-16, se puede observar como a medida que pasan los años, el número de artículos va en aumento, confirmando así el gran interés de la comunidad científica de la obtención de esta energía limpia en aeropuertos de todo el mundo. Ante este avance, la OACI está sacando normativa para regular el uso de las mismas y que no supongan un riesgo para la población.

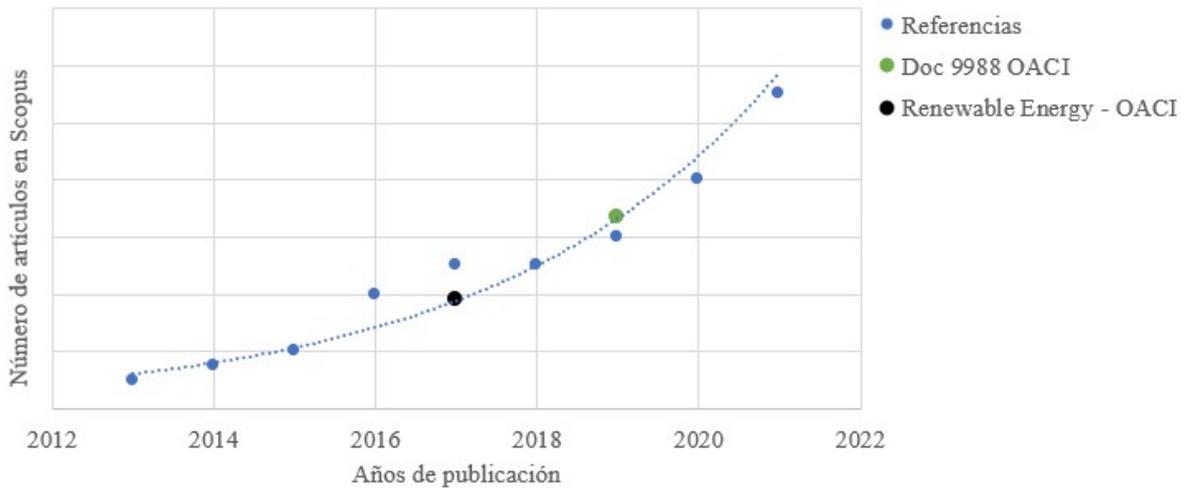


Figura 2-16. Evolución de la Información de la Energía Renovable

### 2.2.2. Casos de Estudio

A continuación, se muestra que, algunos aeropuertos de todo el mundo, han empezado a estudiar las distintas formas para la generación de energía in-situ mediante energías renovables. Uno de los factores principales de todos estos proyectos es la reducción de las emisiones de carbono. Los siguientes estudios ofrecen una visión de lo que los aeropuertos han logrado y cómo lo han logrado.

#### 1. Aeropuerto de Seymour, Galapagos, Ecuador: Energía Solar y Eólica [4]

Este aeropuerto, Figura 2-17, es uno de los únicos aeropuertos del mundo que funciona exclusivamente con energías renovables (solar y eólica). Este consume el 35% de su demanda energética mediante placas fotovoltaicas instalados en las pasarelas de la terminal y el 65% mediante tres generadores eólicos de 750 kW cada uno.



Figura 2-17. Aerogeneradores y paneles solares en el Aeropuerto de Seymour

#### 2. Aeropuerto de East Midlands, Reino Unido: Energía Eólica y Biomasa [4]

Este aeropuerto alberga dos grandes aerogeneradores en la propiedad del aeropuerto que se elevan a 45 metros por encima del suelo, lo que le convierte en la estructura más alta en las inmediaciones del aeropuerto. Estos aerogeneradores tienen una capacidad nominal de 250 kW cada uno, satisfaciendo por consiguiente el 6% de las necesidades del aeropuerto, evitando 300.000 toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub>.

Por otro lado, el aeropuerto cultiva sauces en una parcela de 25 hectáreas y las utiliza como fuente de combustible, evitando el uso de la calefacción y refrigeración tradicional que supondría 280 toneladas de CO<sub>2</sub> adicional al año.

### 3. Aeropuerto de George, Sur de África: Energía Solar [4]

El parque solar está situado junto al aeropuerto en una superficie de 1,2 hectáreas. Consta de 3000 módulos fotovoltaicos con una capacidad nominal de 750 kW, satisfaciendo el 41% de las necesidades eléctricas del aeropuerto, Figura 2-18. El coste del proyecto ronda a un millón de dólares, amortizando la construcción a los 20 años.



Figura 2-18. Proyecto solar en el aeropuerto George

### 4. Aeropuerto Palau International, Micronesia: Energía Solar [4]

Proyecto que consta de 1080 paneles solares de 226 kW instalados en la zona de los aparcamientos en la superficie adyacente al aeropuerto, satisfaciendo el 15% de las necesidades de electricidad del aeropuerto, compensando 80 toneladas de CO<sub>2</sub> al año, Figura 2-19.



Figura 2-19. Instalación solar del aeropuerto

### 5. Aeropuerto Internacional de San Diego, Estados Unidos: Energía Solar [4]

El proyecto de la instalación de placas fotovoltaicas, Figura 2-20, se desarrolló en tres fases:

- Instalación en el tejado de 650 kW en el ala nueva de la segunda terminal.
- Instalación en el parking adyacente a la segunda terminal con un total de 2 MW
- Instalación en el tejado de 650 kW en el ala más antigua de la segunda terminal.



Figura 2-20. Proyecto Solar en el Aeropuerto de San Diego

#### 6. Aeropuerto Internacional de Kansai, Japón: Energía Solar y Eólica [4]

El aeropuerto de Kansai ha desarrollado múltiples proyectos de energía renovables. En 2014 puso en marcha una instalación dividida en dos sistemas de placas fotovoltaicas de 11,6 MW. El primer sistema colocado junto a la pista B y el otro en el un almacén de carga.

En septiembre de 2015, se instaló dos turbinas eólicas Zephyr9000 de 5,5 metros de diámetro, Figura 2-21, combiandas con un banco de baterías de 50 kWh. La producción anual de la misma es de 8.809 kWh. Este sistema proporciona energía para la iluminación, pero también puede proporcionar energía de emergencia.



Figura 2-21. Aerogeneradores en el aeropuerto internacional de Kansai

#### 7. Aeropuerto de La Palma, España: Energía Eólica [7]

El Aeropuerto de La Palma fue el primer aeropuerto europeo en obtener el energía a partir de la energía eólica, siendo el aeropuerto que más energía generó en 2017 con un total de 2.241.916 kWh, seguido del Aeropuerto de Bilbao con un total de 806.932 kWh. El aeropuerto de La Palma dispone actualmente de dos aerogeneradores de Made, modelo AE-46/I, de 660 kW de potencia nominal, 3 palas y con torre de 45 m de altura, los cuáles constituyen la principal fuente de energía del aeropuerto, mientras que la red nacional eléctrica servirá de apoyo por si fallara la primera.

#### 8. Aeropuerto de Cochín, India: Energía Solar [11]

El Aeropuerto de Cochín International se convirtió en el primer aeropuerto con energía solar del mundo en el 2015, cuando transformó una parcela de tierra previamente reservada para el manejo de carga con una superficie de de  $66275 m^2$  en una planta solar formada por 300000 módulos de 12 megavatios.

## 9. Aeropuerto de Lanzarote, España: Energía Solar y Eólica [7]

El aeropuerto del estudio es el Aeropuerto de Lanzarote en el año 2018, con un consumo energético de 14,5 GWh, segregando este consumo con las cifras obtenidas a partir de un aeropuerto de referencia, el Aeropuerto de Santander, ya que se ajusta a la realidad de la mayoría de los Aeropuertos Españoles, obteniéndose la Figura 2-22. Teniendo en cuenta que el factor de emisión de CO<sub>2</sub> es de 0.385 kg CO<sub>2</sub>/kWh, se obtiene unas emisiones de 5582,5 T de CO<sub>2</sub> anual (un 0.017% de las emisiones del CO<sub>2</sub> a nivel mundial).

El objetivo principal de este proyecto es alcanzar las mismas medidas que el Aeropuerto de la Palma. Para ello, Meritxell y Carlos escogieron el panel solar Sunpower SPR-X21-345 ya que posee grandes beneficios y muy buenas características. La ubicación de los mismo es sobre el nivel del mar en la propia superficie del aeropuerto, teniendo en cuenta el posible reflejo de los paneles y las servidumbres físicas del aeropuerto. En cuanto a la energía eólica, se ha colocado 5 aerogeneradores de 45 metros de altura en las proximidades del aeropuerto, respetando todas las servidumbres del propio aeropuerto.

Para todos los casos, es obligatorio realizar un estudio de seguridad operacional y estudio radioeléctrico que garantice que la instalación eólica no supone un peligro para las aeronaves y que la señal de las instalaciones radioeléctricas no se ve afectada, el cual deberá presentarse para su aprobación a la autoridad aeronáutica nacional.

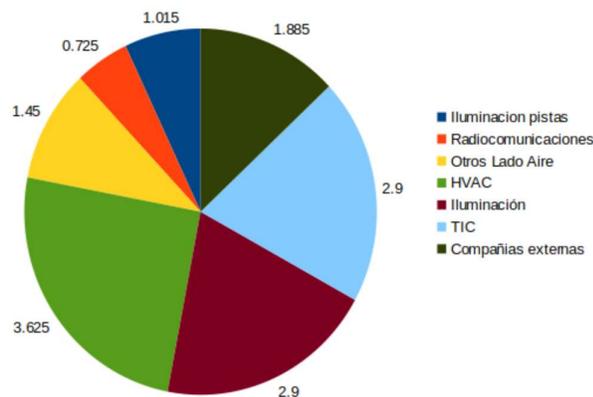


Figura 2-22. Consumo Eléctrico Anual 2018 Aeropuerto de Lanzarote (GWh)

La generación de energía eléctrica a partir de la energía renovables en un plazo de 50 años en el Aeropuerto de Lanzarote es positiva, obteniendo una amortización a los 10 años debido que el exceso de energía producida por estas se podría suministrar a la red general.

## 10. Aeropuerto de Doncaster Sheffield, Inglaterra: Energía Solar [9]

En cuanto a los resultados indicaron que la planta propuesta producía una energía media de 1.034,31 MWh mensuales y 12.411,69 MWh anuales. A parte de la generación de energía, se redujo las emisiones de CO<sub>2</sub> (un total de 11.642,90 toneladas anual). Asimismo, el deslumbramiento es muy poco probable que se produzca durante todo el año; sin embargo, el período de invierno produjo la trayectoria más baja de luz reflejada.

En general, la planta solar propuesta en el aeropuerto de Doncaster Sheffield (DSA) resultó ser viable y genera casi el doble de electricidad de la demanda energética global (6.951,55 MWh) en el aeropuerto de Doncaster Sheffield. Sin embargo, se recomienda que el exceso de energía producida durante el verano se transfiera a la red nacional, que se devolvería durante la temporada de invierno para facilitar la planta fotovoltaica.

## 11. Aeropuerto de Sevilla, España: Energía Solar

Como se indica en el apartado anterior, existe un estudio para la incorporación de energías renovables en el Aeropuerto de Sevilla utilizando una explanada de tierra anexa al aeropuerto. En ella se implementarían 884 módulos para abastecer el 20% de la energía requerida en el mismo.

La rentabilidad del proyecto se hace destacar a partir de los 12 años de funcionamiento siendo este beneficio muy optimista ya que ha considera que la subida del precio de la luz evoluciona de forma lineal junto al IPC.

A modo resumen se ha elaborado una tabla, Tabla 2-5, con todos los aeropuertos mencionados anteriormente que generan energía mediante fuentes renovables:

Aeropuerto	Tipo de Energía	Aspectos Claves
Seymour	Solar y Eólica	Aeropuerto sostenible 100% mediante energías renovables
East Midlands	Eólica y Biomasa	Satisface 6% de la demanda energética utilizando 3 aerogeneradores
George	Solar	Satisface el 41% de la demanda energética mediante 3000 módulos fotovoltaicos
Palau International	Solar	Satisface el 15% de la demanda energética mediante 1080 paneles fotovoltaicos
San Diego	Solar	Implementación de placas en 3 instalaciones diferentes
Kansai	Solar y Eólica	Posee dos sistemas de placas fotovoltaicas de 11,6 MW y dos turbinas eólicas Zephyr9000 con una producción anual de 8.809 kWh
La Palma	Eólica	Posee dos aerogeneradores de Made, modelo AE-46/I, de 660 kW de potencia nominal
Cochin	Solar	Planta solar de 12 MWp con 30000 módulos en una superficie de 66275 m <sup>2</sup>

Tabla 2-5: Aeropuertos que utilizan Energías Renovables

Por otro lado, existen muchos estudios que muestran la posibilidad de la implementación de energías renovables en diferentes aeropuertos, entre los que se destacan, Tabla 2-6:

<b>Aeropuerto</b>	<b>Tipo de Energía</b>	<b>Aspectos Claves</b>	<b>Estudio</b>
<i>Lanzarote</i>	Solar y Eólica	Estudio para la incorporación de placas fotovoltaicas Sunpower SPR-X21-345 y 5 aerogeneradores	<i>Estudio de las posibilidades de uso de energías renovables y construcción de una pista sobre el mar en un aeropuerto de tamaño mediano [7]</i>
<i>Doncaster Sheffield Airport</i>	Solar	Evaluación de viabilidad de planta fotovoltaica (CS3W-400) de 12 MWp y estudio de deslumbramiento	<i>Fully solar powered Doncaster Sheffield Airport: Energy evaluation, glare analysis and CO<sub>2</sub> mitigation. [9]</i>
<i>Sevilla</i>	Solar	Evaluación de viabilidad de implementación de placas fotovoltaicas (AC-340M de Axitec) con un total de 5304 módulos con una potencia de pico total de 1.803.360 kWp. (Superficie total usada de 2,5 hectáreas fuera del aeropuerto)	<i>Estudio de la Implementación de Energía Fotovoltaica en el Aeropuerto de Sevilla [12]</i>

Tabla 2-6: Proyectos de implementación de Energía Renovable

A continuación, se va a mostrar en la Figura 2-23 un mapa con la localización de cada uno de los aeropuertos enunciados anteriormente. Se ha incluido el Aeropuerto de Barajas y el Aeropuerto del Prat en el estudio ya que se está realizando hoy en día el estudio previo para la captación y utilización de energías renovables en sus instalaciones. En verde se puede ver los algunos aeropuertos que utilizan energías renovables y algunos estudios encontrados en la bibliografía.



Figura 2-23: Mapa mundi con aeropuertos estudiados

Así mismo, en las Figuras 2-24, 2-25, 2-26 y 2-27 se mostrará el tipo de fuente de energía que se utiliza (o pretende utilizar) en cada aeropuerto. El sol representa la energía fotovoltaica y el viento representa la energía eólica.



Figura 2-24: Aeropuertos Europeos – Energías Renovables



Figura 2-25: Aeropuertos Asiáticos - Energías Renovables



Figura 2-26: Aeropuerto África - Energías Renovables



Figura 2-27: Aeropuertos Americanos - Energías Renovables

### 2.2.3. Normas Técnicas

Existe una gran cantidad de normativa y reglamento aplicable a cualquier proyecto relacionado con aeropuertos nacionales, entre las que se puede destacar:

- *Real Decreto 584/1972, de 24 de febrero, de servidumbres aeronáuticas [Real 72] [16]*

Las servidumbres son un conjunto de áreas y superficies las cuales deben estar libre de obstáculos con el objetivo de permitir una operación segura y regulada. En España están definidas por el Real Decreto 584/1972, de 24 de febrero, de servidumbres aeronáuticas. Este Real Decreto divide las servidumbres aeronáuticas en tres categorías.

- Servidumbres de los aeródromos: Servidumbres que se establecen alrededor de los aeródromos y su interior para garantizar la continuidad de las operaciones. En la Figura 2-28 se puede observar todas las áreas y superficies de las servidumbres de los aeródromos

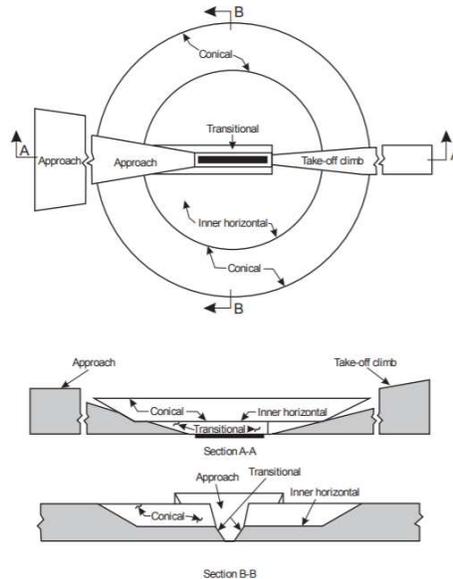


Figura 2-28: Áreas y Superficies de Servidumbre de los Aeródromos

- Servidumbres de las Instalaciones radioeléctricas aeronáuticas: Servidumbre que se establecen para garantizar el correcto funcionamiento de las instalaciones radioeléctricas aeronáuticas que regulan el tráfico aéreo. Entre las servidumbres de las Instalaciones radioeléctricas aeronáuticas destacan la zona de seguridad y la zona de limitación de alturas.
- Servidumbre de la operación de aeronaves: Servidumbres que se establecen para garantizar la seguridad en las diferentes fases de aproximación por instrumento.

A nivel internacional, la OACI trata el establecimiento de estas superficies de protección en el Anexo 14 [ICAO 04], en el Anexo 10 [ICAO 06a], en el volumen II del Documento 8168 [ICAO 06c], y en la parte 6 del Documento 9137 [ICAO 83]. Es necesario destacar que no existe una total concordancia entre la legislación española y la documentación de OACI.

#### ○ **Capítulo 8.1. Anexo 14 de OACI “Diseño y operaciones de aeródromos” [17]**

La seguridad de las operaciones en los aeródromos depende de la calidad del suministro de energía eléctrica. El suministro de energía puede incluir conexiones a una o más fuentes externas, a una o más instalaciones locales de generación y a una red de distribución. En el momento de planificar el sistema de energía eléctrica en los aeródromos es necesario que se tengan en cuenta muchas otras instalaciones de aeródromo que obtienen los suministros del mismo sistema.

Es tan importante el funcionamiento seguro de las instalaciones y de las fuentes de energía que posee ya que el diseño y suministro de energía eléctrica de los dispositivos de ayudas de radionavegación visual y no visual tendrá características tales que cuando falla el suministro, no dejará sin orientación al piloto. Es por eso por lo que se utiliza una fuente secundaria de energía eléctrica que se accionará en el periodo más corto posible cuando falle la fuente principal.

Por otro lado, un aspecto a tener en cuenta es el deslumbramiento. El deslumbramiento es un fenómeno muy perjudicial a la hora del despegue y aterrizaje, es por ello que cuando se incluyen placas fotovoltaicas es recomendable la realización de un estudio de seguridad operacional para ver si este fenómeno puede afectar.

- ***Real Decreto 1663/2000, de 29 de Septiembre, sobre conexión de instalaciones fotovoltaicas a la red de baja tensión (BOE 235-2000 de 30/09/2000).*** [18]

El presente Real Decreto será de aplicación a las instalaciones fotovoltaicas de potencia nominal no superior a 100 kVA y cuya conexión a la red de distribución se efectúe en baja tensión. A estos efectos, se entenderá por conexión en baja tensión aquella que se efectúe en una tensión no superior a 1 kV

- ***Real Decreto 2224/98, de 16 de Octubre, por lo que se establece el certificado de profesionalidad de la ocupación de instalador de sistemas fotovoltaicos y eólicos de pequeña potencia*** [19]

El presente Real Decreto regula el certificado de profesionalidad correspondiente a la ocupación de instalador de sistemas fotovoltaicos y eólicos de pequeña potencia, perteneciente a la familia profesional de Producción, Transformación y Distribución de Energía y Agua, y contiene las menciones configuradoras de la referida ocupación, tales como las unidades de competencia que conforman su perfil profesional, y los contenidos mínimos de formación idóneos para la adquisición de la competencia profesional de la misma ocupación, junto con las especificaciones necesarias para el desarrollo de la acción formativa; todo ello de acuerdo al Real Decreto 797/1995

- ***Real Decreto 900/2015, que establece la obligación de las instalaciones de autoconsumo a contribuir a la financiación de los costes y servicios del sistema en la misma cuantía que el resto de los consumidores*** [20]

El real decreto tiene por objeto el establecimiento de las condiciones administrativas, técnicas y económicas para las modalidades de autoconsumo de energía eléctrica definidas en el artículo 9 de la Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico.

Lo dispuesto en este real decreto resulta de aplicación a las instalaciones conectadas en el interior de una red, aun cuando no viertan energía a las redes de transporte y distribución en ningún instante, acogidas cualquier de las modalidades de autoconsumo de energía eléctrica a), b), y c), definidas en el artículo 9 de la Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico

# 3. DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO

Antes de realizar el estudio energético y económico de las diferentes medidas de eficiencia energética en instalaciones aeroportuarias, se debe definir una metodología a seguir en el que se expongan los pasos a seguir. Para el caso de este estudio serán los siguientes:

1. Punto de partida y recolección de datos del aeropuerto
2. Diseño de las centrales energéticas
3. Estimación de la reducción de CO<sub>2</sub>
4. Análisis económico y de rentabilidad

## 3.1. Punto de Partida y Recolección de datos del aeropuerto

Para el estudio energético y económico de medidas de eficiencia energética en instalaciones aeroportuarias se va a coger como referencia el Aeropuerto de Sevilla. En el mismo, se va a determinar la posibilidad de la implementación de métodos de obtención de energía de forma renovable y, posteriormente, se realizará un análisis económico para ver la viabilidad del proyecto.

El aeropuerto se encuentra localizado a unos 10 Km al NE de la ciudad de Sevilla, en el Km 533 de la carretera N-IV Madrid-Cádiz. El aeropuerto pertenece a los términos municipales de Sevilla y La Rinconada y ocupa una superficie aproximada de 893 Ha. Sus coordenadas geográficas son 37°25'05" de latitud norte 5°53'56" longitud oeste, Figura 3-1. [21]



Figura 3-1: Localización del aeropuerto de Sevilla

Como se puede observar en la Figura 3-2, el número de pasajeros en el Aeropuerto de Sevilla ha ido aumentando a lo largo de los años llegando a 7544,4 miles de pasajeros en el año esperando que siguiera la misma tendencia en los siguientes años. Debido a la situación sanitaria del año 2020, el número de pasajeros descendió drásticamente llegando a su mínimo histórico de 2315,8 miles de personas. Asimismo, se espera que vuelva a recuperar el volumen de tráfico del aeropuerto en los años venideros ya que se ha visto una evolución el 2021.

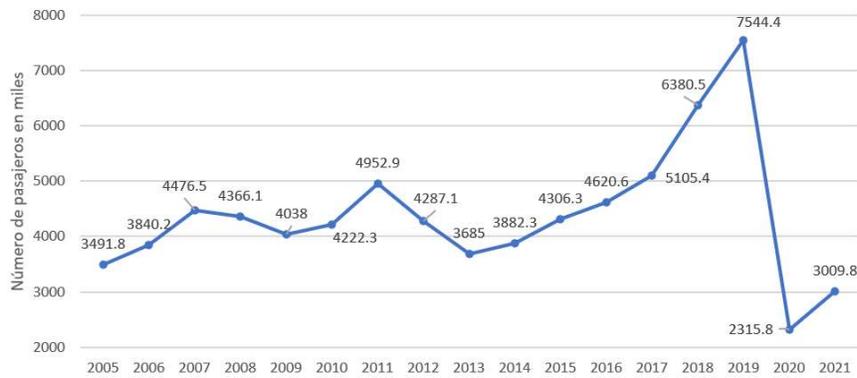


Figura 3-2: Volumen anual de tráfico de pasajeros en el Aeropuerto de Sevilla [22]

Para el siguiente estudio se va a abstener de los datos registrados en los últimos dos años (ya que se espera una recuperación en los próximos años) marcando como flujo de pasajeros para el estudio los recogidos en el 2019. En la Figura 3-3 se puede observar como el aeropuerto de la capital andaluza maneja un flujo uniforme de pasajeros a lo largo de todo el año destacando los meses que van desde marzo a octubre. Esto se puede deber al buen clima que tiene la provincia además de la proximidad que hay con las cosas del sur de Andalucía.



Figura 3-3: Volumen mensual de tráfico de pasajeros en el Aeropuerto de Sevilla en 2019 [22]

El Aeropuerto de Sevilla está dentro del clima mediterráneo con una variante de matiz atlántico que debe sus características al flujo del Oeste. La temperatura media en el Aeropuerto de Sevilla es de 30°C, alcanzando las máximas temperaturas en los meses de julio y agosto con una temperatura aproximada de 45°C, Figura 3-4.

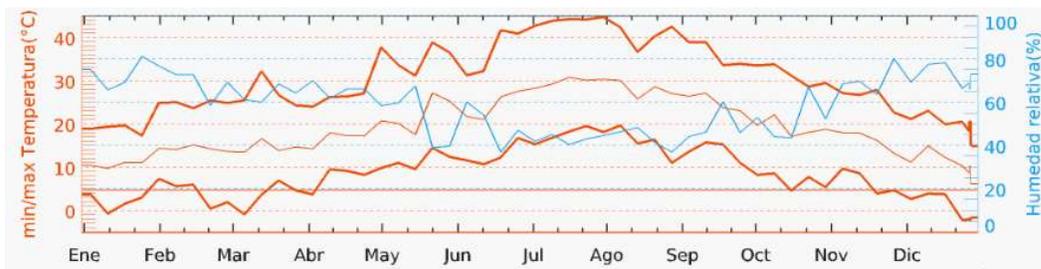


Figura 3-4: Temperaturas en el Aeropuerto de Sevilla en 2020. [23]

Por otro lado, en la provincia de Sevilla, la mayoría de los días están soleados o parcialmente soleados. En la Figura 3-5 se muestra número de días de sol, parcialmente nublado, nublados y precipitaciones en las inmediaciones del Aeropuerto a lo largo de los meses.

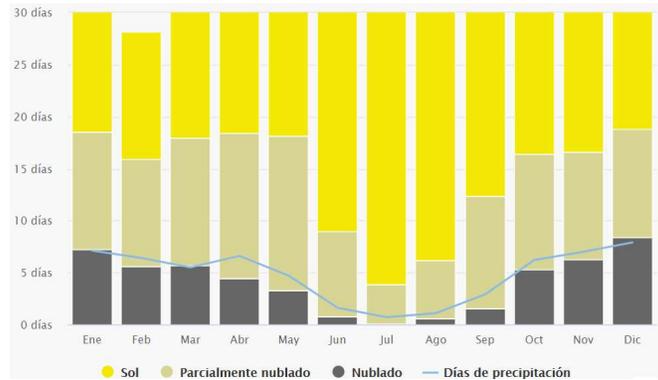


Figura 3-5: Estado mensual del clima en Sevilla [23]

Como se puede observar en la figura anterior, existe aproximadamente 180 días al año donde el cielo de Sevilla está completamente despejado, 145 días cielos parcialmente nublados y 40 días totalmente nublado. Es por esto por lo que la incorporación de placas fotovoltaicas puede ser un pilar fundamental en la obtención de energía renovable. Para la posible incorporación de estas, es importante conocer los datos de radiación que se obtienen en el Aeropuerto de Sevilla. Según la Agencia Andaluza de Energía se puede destacar la radiación global. Figura 3-6, la radiación Difusa, Figura 3-7 y la radiación directa, Figura 3-8.



Figura 3-6: Radiación Global en el Aeropuerto de Sevilla

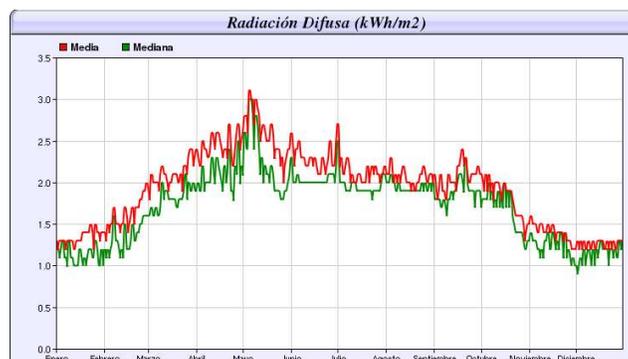


Figura 3-7: Radiación Difusa en el Aeropuerto de Sevilla



Figura 3-8: Radiación Directa en el Aeropuerto de Sevilla

Por otro lado, ante la posibilidad de incluir aerogeneradores, se muestra un estudio eólico a partir de una tabla que muestra el número de observaciones de intensidades y direcciones del viento en el Aeropuerto de Sevilla, Figura 3-9. Como se observa, la dirección predominante es SW-NE (05-23), Figura 3-10. Debido a la localización de la ciudad de Sevilla, esta dirección se utiliza como calle de rodaje, denominándose la pista en la dirección 09-27. [21]

Dirección del viento	Velocidad del viento en nudos													Total
	Calma	1-3	4-6	7-10	11-16	17-21	22-27	28-33	34-40	41-47	48-55	56-63	>63	
Calma	11.124	><	><	><	><	><	><	><	><	><	><	><	><	11.124
N	><	30	284	164	72	12	4	2	2					570
NNE	><	35	467	429	245	23	9	2	1					1.211
NE	><	41	661	910	753	133	42	9	1					2.550
ENE	><	19	196	276	369	109	28	11	4					1.032
E	><	16	177	256	269	66	16	16	1					817
ESE	><		75	69	59	14	2	1	1					222
SE	><	6	113	78	78	30	5	2	1					313
SSE	><	6	137	118	80	38	16	8	2	1	1			407
S	><	48	496	438	406	168	76	41	20	4	2			1.698
SSW	><	18	439	529	656	287	87	46	13	2				2.077
SW	><	38	813	1.108	1.120	364	109	36	18		1			3.607
WSW	><	23	329	434	349	110	21	10	2		1			1.279
W	><	31	379	392	217	61	8	3						1.091
WNW	><	12	198	164	78	10	3	1						466
NW	><	14	208	183	89	13	2							509
NNW	><	11	92	90	36	12	2							243
<b>TOTAL</b>	11.124	348	5.064	5.658	4.876	1.450	431	187	66	7	5			29.216

FUENTE: Instituto Nacional de Meteorología

Figura 3-9: Intensidad y dirección del viento en el Aeropuerto de Sevilla

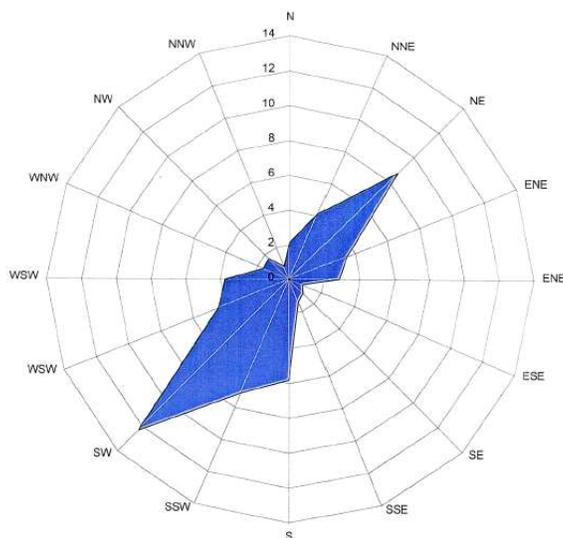


Figura 3-10: Rosa de Vientos en el Aeropuerto de Sevilla

Antes de nada, se debe conocer el gasto de energía eléctrica que tiene el aeropuerto en la actualidad. Para ello se utilizará los datos registrados en el Anexo A del presente documento, el cual especifica en el informe la cantidad de energía total consumida en el año 2016.

No se ha encontrado ningún documento oficial del consumo energético en los siguientes años, por lo que se va a realizar una pequeña corrección en los valores utilizando el historio, Tabla 3-1, ya que, al haber mayor flujo de pasajeros, se necesita mayor cantidad de energía. Por otro lado, el precio de la electricidad ha variado en gran cantidad con respecto a los años anteriores, aspecto para tener en cuenta en el estudio de rentabilidad del proyecto.

<b>Año</b>	<b>Consumo energético (kWh)</b>	<b>Consumo promedio (kWh/pasajero)</b>
<b>2014</b>	14.089.000	4,08
<b>2015</b>	13.721.000	3,53
<b>2016</b>	13.998.135	3,22

Tabla 3-1: Histórico de Consumo Energético/Pasajeros/Consumo promedio en el Aeropuerto de Sevilla

Utilizando el consumo promedio y multiplicándolo por la cantidad de pasajeros del año 2019 (7.544.400) se obtiene el consumo energético mínimo para el flujo de turistas. Se puede observar en la tabla anterior como el consumo promedio va disminuyendo a lo largo de los años, por lo que la tendencia es que en el 2019 el consumo promedio por pasajero disminuya. Teniendo en cuenta que son cálculos aproximados se va a escoger un caso restrictivo y se va a realizar los cálculos con el consumo promedio del 2016 (3,22)

Por consiguiente, el consumo energético para la cantidad de pasajeros correspondiente al año 2019 es de 24.293.968 kWh. Debido a que el consumo de la energía no es directamente proporcional al número de pasajeros, se va a estimar un consumo energético de 20.000.000 kWh.

<b>Año</b>	<b>Consumo energético (kWh)</b>	<b>Pasajeros</b>	<b>Consumo promedio (kWh/pasajero)</b>
<b>2019</b>	20.000.000	7.544.400	2,65

Tabla 3-2: Estimación del consumo energético en 2019 (Anual).

Una vez definido el consumo energético de carácter anual, se va a realizar el perfil de uso energético del Aeropuerto de Sevilla de carácter mensual. Para ellos se utilizará el histórico mensual de los años 2014, 2015 y 2016 y se calcula el por ciento total de la energía consumida en ese mes, Tabla 3-3.

<b>Mes</b>	<b>2014</b>		<b>2015</b>		<b>2016</b>	
	Consumo (kWh)	%	Consumo (kWh)	%	Consumo (kWh)	%
<b>Enero</b>	1.110.000	7.88	1.183.000	8.62	1.119.229	8.00
<b>Febrero</b>	981.000	6.96	968.000	7.05	1.010.268	7.22
<b>Marzo</b>	978.000	6.94	905.000	6.60	1.025.972	7.33
<b>Abril</b>	1.057.000	7.50	951.000	6.93	954.138	6.82
<b>Mayo</b>	1.178.000	8.36	1.162.000	8.47	1.168.095	8.34
<b>Junio</b>	1.290.000	9.16	1.252.000	9.12	1.257.860	8.99
<b>Julio</b>	1.444.000	10.25	1.528.000	11.14	1.535.909	10.97
<b>Agosto</b>	1.515.000	10.75	1.415.000	10.31	1.422.255	10.16
<b>Septiembre</b>	1.310.000	9.30	1.191.000	8.68	1.316.103	9.40
<b>Octubre</b>	1.142.000	8.11	1.096.000	7.99	1.147.851	8.20
<b>Noviembre</b>	914.000	6.49	981.000	7.15	918.344	6.56
<b>Diciembre</b>	1.170.000	8.30	1.089.000	7.94	1.122.111	8.02

Tabla 3-3: Porcentaje de energía consumida mensualmente

Utilizando la Tabla 3-3 y sabiendo que se consume una cantidad de 20.000.000 kWh anual, se determina la energía consumida mensualmente realizando un promedio del porcentaje del consumos del aeropuerto mensualmente, Tabla 3-4. En la Figura 3-11 se puede observar como el consumo energético es mayor en los meses de verano. Esto puede ser debido a la gran cantidad de energía que tiene que consumir en la climatización del aeropuerto debido al calor en estos meses. En cambio, en el mes de enero también se consume una cantidad considerable de energía debido a la calefacción usada en las instalaciones.

Mes	Promedio del %	Consumo (kWh)
<b>Enero</b>	8.17	1.633.058
<b>Febrero</b>	7.08	1.415.661
<b>Marzo</b>	6.96	1.391.111
<b>Abril</b>	7.08	1.416.631
<b>Mayo</b>	8.39	1.678.303
<b>Junio</b>	9.09	1.817.779
<b>Julio</b>	10.79	2.157.172
<b>Agosto</b>	10.41	2.081.736
<b>Septiembre</b>	9.13	1.825.343
<b>Octubre</b>	8.10	1.619.560
<b>Noviembre</b>	6.73	1.346.495
<b>Diciembre</b>	8.09	1.617.149

Tabla 3-4: Perfil de uso energético del Aeropuerto de Sevilla 2019.

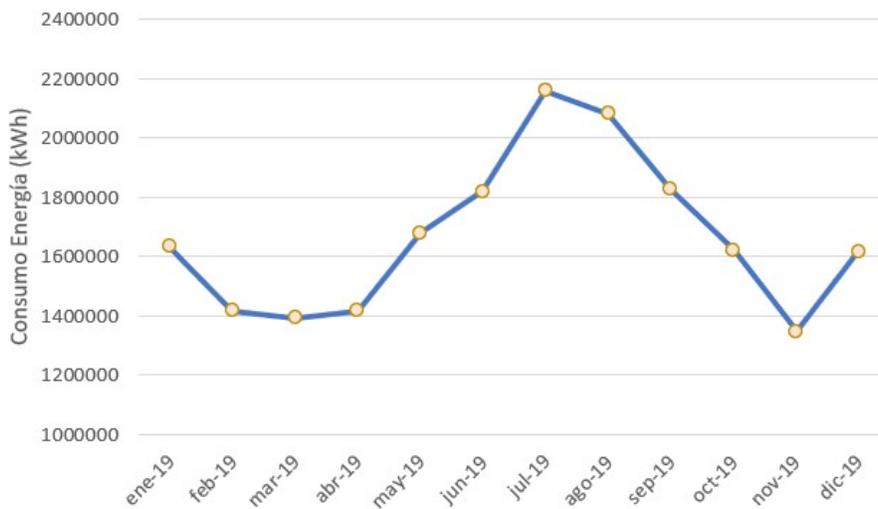


Figura 3-11: Perfil de uso energético del Aeropuerto de Sevilla 2019.

## 3.2. Diseño de las centrales energéticas

Como se ha comentado en puntos anteriores, se va a determinar la posibilidad de la implementación de métodos de obtención de energía de forma renovable en el Aeropuerto de Sevilla. Para ello se va a estudiar la oportunidad de incorporar placas fotovoltaicas en los techos de las instalaciones aeroportuarias y posibilidad de incorporación de aerogeneradores en sus inmediaciones, todo ello sin perjudicar ni la seguridad aérea ni la seguridad de los pasajeros.

### 3.2.1. Diseño de central fotovoltaica en las instalaciones aeroportuarias

Con la intención de no perturbar el espacio aéreo, no dificultar las actividades principales de los aeropuertos y no perjudicar la seguridad personal de los pasajeros, se debe buscar un espacio óptimo para las localizaciones de las placas fotovoltaicas. Entre las posibles ubicaciones de estas destacan:

- Terminal y parking principal P1: Las placas fotovoltaicas pueden localizarse en los techos de estos dos edificios, Figura 3-12, dando una extensión aproximada de 55474 m<sup>2</sup>. [24]



Figura 3-12: Superficie de Terminal y parking principal P1

- Parking de larga duración P2: Se puede colocar las placas en el tejado del parking, dando una superficie de 36327 m<sup>2</sup>, Figura 3-13
- Hangar: Dentro de la propia instalación aeroportuaria se puede colocar en el techo del hangar los captadores solares en una superficie aproximada de 4097 m<sup>2</sup>, Figura 3-14.
- Antigua Terminal y Terminal de Carga: Además de todos los edificios anteriores, tanto en la antigua terminal como en la terminal de carga se pueden colocar las placas fotovoltaicas dando una superficie de 5.876 m<sup>2</sup> y 5229 m<sup>2</sup>, Figura 3-15, Figura 3-16, respectivamente.

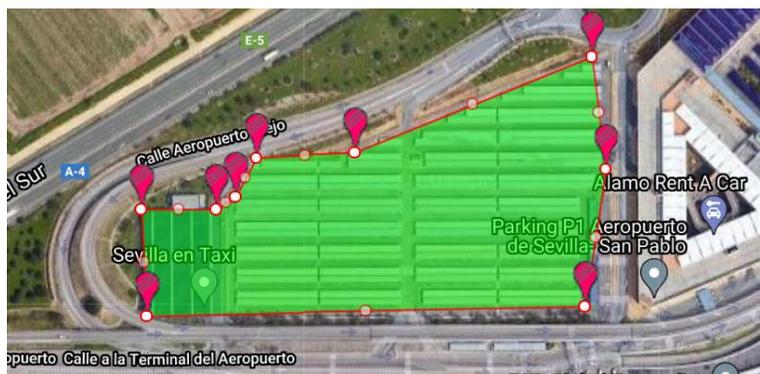


Figura 3-13: Superficie del parking de larga duración P2



Figura 3-14: Superficie del hangar



Figura 3-15: Superficie de la antigua terminal



Figura 3-16: Superficie de la terminal de carga

En la Tabla 3-5 se puede ver la cantidad total de superficie disponible en el Aeropuerto de Sevilla para la incorporación de la energía fotovoltaica. Se puede observar como la terminal y ambos parkings son las extensiones con mayor superficie, ya que corresponde casi el 86% de la superficie total de la zona admisible para la colocación de las placas fotovoltaicas.

Una vez que se ha determinado la superficie disponible que se posee en el aeropuerto, se procederá al cálculo de la potencia de la planta fotovoltaica, del inversor para así elegir el módulo y el inversor fotovoltaico. Para ello se va a tener en las referencias [9] y [12] ya que realizaron un estudio de aquellos componentes que mejor funcionan en las proximidades del aeropuerto.

Localización	Superficie aproximada (m <sup>2</sup> )
<i>Terminal y parking principal P1</i>	55.474
<i>Parking de larga duración P2</i>	36.327
<i>Hangar</i>	4.097
<i>Antigua Terminal</i>	5.876
<i>Terminal de Carga</i>	5.229
<b>TOTAL</b>	107.003

Tabla 3-5: Superficie operativa para inclusión placas fotovoltaicas

○ **Potencia de la planta fotovoltaica**

Para el calculo de la potencia de la planta fotovoltaica mensual se utilizará la Ecuación 3-1.

$$P = \frac{G_{CEM} \cdot E}{G_{dm} \cdot \text{Número de días} \cdot P_R}$$

Ecuación 3-1: Cálculo de la potencia de la planta fotovoltaica

Siendo:

**$G_{CEM}$** : Irradiancia solar en condición estándar  $\rightarrow G_{CEM} = 1000 \frac{W}{m^2}$

**$E$** : Energía consumida por el aeropuerto en función del mes. Como no se tiene el valor mensual ya que se ha realizado una estimación mensual, se considerará que se consume la misma cantidad de energía todos los meses (Valor de la Tabla 3 – 4)

**$G_{dm}$** : Valor medio mensual de la irradiación diaria sobre una superficie horizontal. Este depende de  $\alpha$  y  $\beta$  que se consideran 0 y 35 por la localización del aeropuerto  $\left(\frac{kWh}{m^2 \cdot \text{días}}\right)$ . Valores recogidos de la referencia[12]

**$P_R$** : Coeficiente de Rendimiento  $\rightarrow$  Aporta información sobre la eficiencia energética y la fiabilidad de la instalación. Suele considerarse valores entre 0.7 y 0.8. En el caso de este estudio 0.75

Dando por consiguiente los resultados que se muestran en la Tabla 3-6.

Mes	$G_{dm}$	P (MW)
Enero	4.3	16.33
Febrero	5.27	12.79
Marzo	6.2	9.65
Abril	6.29	10
Mayo	6.71	10.75
Junio	7.13	11.33
Julio	7.46	12.43
Agosto	7.36	12.16
Septiembre	6.46	12.55
Octubre	5.74	12.13
Noviembre	4.71	12.7
Diciembre	4.08	17.04
Promedio	5.98	12.49

Tabla 3-6: Cálculo de la potencia de planta fotovoltaica

Como se puede observar, para que el aeropuerto de Sevilla sea totalmente sostenible mediante placas fotovoltaicas hace falta un promedio de 12.50 MW. Como se comentó en el Apartado “Estado del Arte”, un estudio realizado por Mueller et al. [10] afirma que la superficie necesaria para una planta de energía fotovoltaica de 1 MW suele ser de 9.290,30 metros cuadrados, por lo que la planta propuesta de 12.50 MW necesitaría un mínimo de 120.000 metros cuadrados. Posteriormente se calculará la superficie necesaria con exactitud.

Puesto que la superficie requerida es mayor a la superficie disponible, no se puede obtener energía suficiente para abastecer completamente el aeropuerto mediante esta energía renovable. Es por ello por lo que es necesario obtener una mayor superficie fuera de las instalaciones aeroportuarias o utilizar otro medio de captación de energía renovable, como puede ser el caso de la energía eólica.

La potencia de un campo fotovoltaico común ronda los 260 kW y los 330 kW, por lo que en el caso del presente análisis se va a considerar una potencia de 300 kW. Como en el cálculo de la potencia se ha obtenido una potencia promedio de 12.49 MW, pero debido a pérdidas que se pueden ocasionar en el proceso, se escoge una potencia nominal de 12,60 MW. Se divide la potencia nominal necesaria entre la potencia de cada campo fotovoltaico, necesitando por consiguiente 42 subcampos fotovoltaicos.

○ **Cálculo de la potencia del inversor**

La potencia del inversor ( $P_I$ ) está directamente relacionada con la potencia del campo fotovoltaico ( $P$ ) a partir de la siguiente expresión:

$$0,7 \cdot P < P_I < 1,2 \cdot P$$

Como la potencia del campo fotovoltaico se ha definido anteriormente como 300 W, la potencia del inversor debe rondar entre:

$$210 W < P_I < 360 W$$

Una vez definido la potencia nominal de la planta fotovoltaica, la potencia del campo fotovoltaico (así determinándose el número de subcampos necesarios) y la potencia del inversor, se debe realizar un estudio de mercado para determinar el módulo fotovoltaico, así como el inversor adecuado para su uso. En este caso, no se va a realizar un estudio de mercado ya que en la referencia [12] se determinó la opción más eficiente y económica para las mismas condiciones tanto de potencia como ambientales en el Aeropuerto de Sevilla.

El módulo escogido para la implementación del campo fotovoltaico es el modelo AC-340M de Axitec. El presente módulo es monocristalino, es por eso por lo que la potencia nominal puede alcanzar 340 W de potencia de pico.

Asimismo, el inversor escogido para el estudio es el PVS800-57-0250KW de ABB, con una potencia máxima de 450 V, ya que se trata de un mdelo compacto con una instalación sencilla. El proveedor garantiza una vida útil de mínimo 20 años.

○ **Configuración de la instalación fotovoltaica.**

**1. Módulos en serie**

Para determinar en número mínimo de módulos en serie se usará la Ecuación 3-2 para determinar el número mínimo y la Ecuación 3-3 para determinar el número máximo.

$$N_{min} = \frac{V_{Min}}{V_{Min}(70^{\circ}C)} = 14$$

Ecuación 3-2: Número mínimo de módulos en serie

Siendo:

$V_{Min}$ : Tensión mínima en el punto de máxima potencia del inversor  $\rightarrow V_{MPP} = 450 V$

$V_{Min}(70^{\circ}C)$ : Tensión mínima en el punto de máxima potencia del inversor a una temperatura de célula de  $70^{\circ}C \rightarrow V_{MPP}(70^{\circ}C) = 32,8 V$

$$N_{max} = \frac{V_{Max}}{V_{CA}(-10^{\circ}C)} = 19$$

Ecuación 3-3: Número máximo de módulos en serie

Siendo:

$V_{Max}$ : Tensión máxima admisible en la entrada del inversor. Según fabricante  $\rightarrow V_{Max} = 1000 V$

$V_{CA}(-10^{\circ}C)$ : Tensión de circuito abierto del módulo evaluada a  $-10^{\circ}C \rightarrow V_{CA}(-10^{\circ}C) = 51,7$  este valor no suele aparecer por lo que se coge el valor a condiciones de referencia estándar

Por lo que, para el diseño del campo fotovoltaico, se deberá tener como mínimo 14 placas fotovoltaicas en serie y como máximo 19.

**2. Módulos en paralelo**

Para dimensionar la cantidad de módulos máximos que pueden ir en paralelo se utiliza la Ecuación 3-3

$$N_{max} = \frac{I_{Max}}{I_S} = 67$$

Siendo:

$I_{Max}$ : Corriente admisible de entrada en el inversor  $\rightarrow I_{MAX} = 600 A$  (fabricante)

$I_S$ : Corriente nominal de cada módulo fotovoltaico  $\rightarrow I_S = 8.95 A$  (fabricante)

Como se ha definido anteriormente, el campo fotovoltaico tiene que generar una potencia nominal de 300 kW, por lo que se debe encontrar una configuración (número de módulos en serie y paralelo) maximizando la generación de potencia, pero teniendo en cuenta un margen de seguridad de este. Realizando los cálculos, las únicas posibilidades que se tienen son que se muestran en la Tabla 3-7 (se han descartado todas las opciones que la potencia sea inferior a 300 kW y superior a 310 kW). En la Tabla 3-7 se puede observar tres colores diferenciados. El color verde representa las posibilidades según lo definido, el color naranja son valores que no llegan al mínimo establecido y el color amarillo son potencia superior a 310 kW. No se ha mostrado las configuraciones restantes ya que no se encuentra ningún valor entre los valores establecidos.

P = Pin·Par·Ser Unidad: kW		Módulos en Paralelo								
		47	50	52	53	56	59	60	64	65
Módulos en Serie	14	223.72	238	247.52	252.28	266.56	280.84	285.6	304.64	309.4
	15	239.7	255	265.2	270.3	285.6	300.9	306	326.4	331.5
	16	255.68	272	282.88	288.32	304.64	320.96	326.4	348.16	353.6
	17	271.66	289	300.56	306.34	323.68	341.02	346.8	369.92	375.7
	18	287.64	306	318.24	324.36	342.72	361.08	367.2	391.68	397.8
	19	303.62	323	335.92	342.38	361.76	381.14	387.6	413.44	419.9

Tabla 3-7: Calculo de la potencia (kW) del campo fotovoltaico en función de la configuración de los módulos.

Para decir el número de módulos en serie y paralelo, primero se va a determinar el superficie que ocuparía cada una de las opciones que se tiene para así optimizar la superficie usada en el aeropuerto.

○ **Determinación de la superficie de la instalación**

Lo primero que se debe realizar para determinar la superficie de la instalación es calcular la distancia entre los módulos fotovoltaicos para aprovechar el mayor captación de energía y que no produzcan sombras entre ellos, Figura 3-17.

Para determinar la distancia mínima entre los módulos fotovoltaicos se utiliza la Ecuación 3-4.

$$g \geq c \cdot k$$

$$c = b \cdot \text{sen } \beta$$

$$k = \frac{1}{\tan (61 - \phi)}$$

Ecuación 3-4: Cálculo de distancia mínima entre módulos

Siendo:

*g*: Distancia mínima entre módulos

*b*: Longitud del panel →  $b = 1.956 \text{ m}$  (fabricante)

*β*: Inclinación del soporte →  $\beta = 30^\circ$

*φ*: Latitud →  $\phi = 37.418^\circ$

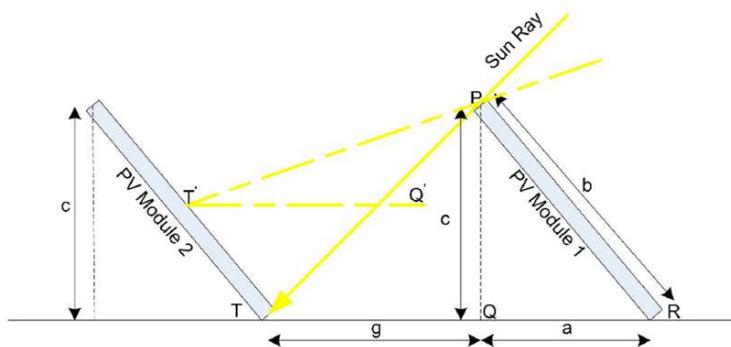


Figura 3-17: Cálculo de la distancia mínima entre módulos

Realizando los cálculos, la distancia mínima es de 2.29 metros, es decir, la distancia entre varios módulos en paralelo tiene que ser 2.29 metros.

Considerando una separación entre módulos mínima, 0.1 m, y una ancho de placa de 0.992 m (fabricante), cada fila del campo fotovoltaico tendrá una longitud determinada en la Ecuación 3-5. En la Tabla 3-8 se puede observar las diferentes longitudes.

$$Long. Fila = 0.1 \cdot (Módulos Serie - 1) + 0.992 \cdot Módulos Serie$$

Ecuación 3-5: Cálculo de longitud de fila

Módulos en serie	Longitud de fila (m)
14	15.19
15	16.28
16	17.372
17	18.46
18	19.56
19	20.65

Tabla 3-8: Longitud de fila en función de la cantidad de módulos en serie

Por otro lado, para el cálculo de longitud total de columnas hay que tener en cuenta la distancia mínima anteriormente calculada y la longitud real de la placa (a 30 grados) es de 1.68 m (1.94 por el coseno de 30). Se calcula la longitud total con la Ecuación 3-6. En la Tabla 3-9 se puede observar las diferentes longitudes.

$$Long. Columna = 1.68 \cdot Módulos Paralelo + 2.29 \cdot (Módulos Paralelo - 1)$$

Ecuación 3-6: Cálculo de longitud de columnas

<b>Módulos en paralelo</b>	<b>Longitud de columna (m)</b>
47	184.3
50	196.21
52	204.15
53	208.12
56	220.03
59	231.94
60	235.91
64	251.79
65	255.76

Tabla 3-9: Longitud de columnas en función de la cantidad de módulos en paralelo

Entre las posibles opciones, se va a escoger una instalación con 17 módulos en serie y 53 módulos en paralelos con una superficie de  $3842.73 \text{ m}^2$ , generando una potencia de 306.34 kW. Se ha decantado por esta opción porque analizando la superficie disponible en las instalaciones aeroportuarias, por  $70 \text{ m}^2$ , se obtiene un poco 0.1 MW de potencia más.

Asimismo, para calcular los subcampos fotovoltaicos que se van a instalar en las inmediaciones del aeropuerto, se debe tener en cuenta las superficies calculadas en la Tabla 3-5. Se divide las superficies de cada instalación entre la superficie calculada anteriormente obteniéndose la cantidad de subcampos, Tabla 3-10.

<b>Localización</b>	<b>Cálculo de subcampos</b>	<b>Subcampos</b>
<i>Terminal y parking principal P1</i>	14.44	14
<i>Parking de larga duración P2</i>	9.45	9
<i>Hangar</i>	1.07	1
<i>Antigua Terminal</i>	1.53	1
<i>Terminal de Carga</i>	1.36	1
<b>Total</b>		26

Tabla 3-10: Cálculo de subcampos en las instalaciones aeroportuarias

En la Tabla 3-11 se pueden ver los valores de la instalación creada.

<b>Campo</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>26</b>	<b>Total</b>
<b>Módulos</b>	901	901	901	901	23426
<b>Superficie (m<sup>2</sup>)</b>	3842.73	3842.73	3842.73	3842.73	99910.98
<b>Potencia (MW)</b>	0.31	0.31	0.31	0.31	7.97

Tabla 3-11: Resumen de la configuración final placas fotovoltaicas dentro del aeropuerto

Se observa que la cantidad de potencia generada por la instalación fotovoltaica es menor a la necesaria para abastecer de energía a toda la instalación aeroportuaria. En la Tabla 3-12 se puede observar la cantidad de energía necesaria para abastecer todo el aeropuerto mensualmente, la potencia extra necesaria (que no se ha podido generar en este diseño) y el porcentaje de potencia mensual generado.

<b>Mes</b>	<b>Irradiancia</b>	<b>P necesaria (MW)</b>	<b>P restante (MW)</b>	<b>%</b>
<b>Enero</b>	4.3	16.33	8.37	48.81
<b>Febrero</b>	5.27	12.79	4.83	62.31
<b>Marzo</b>	6.2	9.65	1.69	82.59
<b>Abril</b>	6.29	10	2.04	79.70
<b>Mayo</b>	6.71	10.75	2.79	74.14
<b>Junio</b>	7.13	11.33	3.37	70.34
<b>Julio</b>	7.46	12.43	4.47	64.12
<b>Agosto</b>	7.36	12.16	4.2	65.54
<b>Septiembre</b>	6.46	12.55	4.59	63.51
<b>Octubre</b>	5.74	12.13	4.17	65.70
<b>Noviembre</b>	4.71	12.7	4.74	62.76
<b>Diciembre</b>	4.08	17.04	9.08	46.77

Tabla 3-12: Porcentaje de potencia mensual generado

En los meses de invierno la potencia que se debe generar es mayor que en los meses de verano, aunque el consumo de energía es menor. Esto es debido al valor de la irradiancia del sol, que es casi la mitad que en los meses de verano. Por otro lado, en lo meses de primavera, el campo fotovoltaico es capaz de suministrar gran cantidad del energía llegando incluso a abastecer el 82% de la energía necesaria. Asimismo, aunque en los meses de verano la irradiancia sea mayor, el consumo también es mayor debido a la refrigeración de las instalaciones, es por eso por lo que solo se pueda abastecer el 70 o 65% del total. En otoño el valor de la potencia necesaria se regulariza pudiendo abastecer el diseño creado aproximadamente el 65%.

Si se quiere abastecer el 100% de la energía consumida en el aeropuerto, se tiene que buscar otra forma de obtención de energía. Existen dos opciones:

- Diseño de una central fotovoltaica en las proximidades del aeropuerto
- Diseño de aerogeneradores en las instalaciones/proximidades del aeropuerto.

La energía restante necesaria para que se abastezca el aeropuerto de manera autosuficiente se puede observar en la Tabla 3-13.

<b>Mes</b>	<b>Energía generado (kWh)</b>	<b>Energía necesaria (kWh)</b>
<b>Enero</b>	796.80	836.26
<b>Febrero</b>	882.04	533.62
<b>Marzo</b>	1148.88	242.24
<b>Abril</b>	1127.95	288.68
<b>Mayo</b>	1243.38	434.92
<b>Junio</b>	1278.59	539.19
<b>Julio</b>	1382.36	774.82
<b>Agosto</b>	1363.83	717.91
<b>Septiembre</b>	1158.44	666.90
<b>Octubre</b>	1063.64	555.92
<b>Noviembre</b>	844.62	501.87
<b>Diciembre</b>	756.03	861.11

Tabla 3-13: Energía generada y Energía restante necesaria

### 3.2.2. Diseño de central fotovoltaica en las proximidades del aeropuerto

En el apartado anterior se ha calculado los subcampos fotovoltaicos dentro de las instalaciones aeroportuarias dando la posibilidad de crear 26 subcampos, quedando por consiguiente 16 subcampos para generar la potencia nominal de 12,60 MW.

Para la incorporación de los subcampos restantes se va a utilizar la misma instalación que la del interior del aeropuerto con las mismas características, Tabla 3-14, por lo que se necesitará una superficie de 61.484 m<sup>2</sup> adicional. En la Figura 3-18 se puede observar una superficie cercana del aeropuerto donde se puede realizar el campo fotovoltaico ya que posee una superficie de 62222 m<sup>2</sup> [24]. Esta instalación supondría un plus mas en el coste debido a la necesidad de adquisición del terreno.

Con esta superficie externa se puede conseguir una potencia mensual de 4.9 MW, quedando la instalación total como se muestra en la Tabla 3-15.



Figura 3-18: Posible superficie anexa al aeropuerto para incorporación de instalación

<b>Campo</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>16</b>	<b>Total</b>
<b>Módulos</b>	901	901	901	901	14416
<b>Superficie (m<sup>2</sup>)</b>	3842.73	3842.73	3842.73	3842.73	61484
<b>Potencia (MW)</b>	0.31	0.31	0.31	0.31	4.90

Tabla 3-14: Características de la instalación en las proximidades del aeropuerto

<b>Mes</b>	<b>P necesaria (MW)</b>	<b>P instalación (MW)</b>	<b>Diferencia (MW)</b>
<b>Enero</b>	16.33	12.86	3.53
<b>Febrero</b>	12.79	12.86	-0.01
<b>Marzo</b>	9.65	12.86	-3.15
<b>Abril</b>	10	12.86	-2.8
<b>Mayo</b>	10.75	12.86	-2.05
<b>Junio</b>	11.33	12.86	-1.47
<b>Julio</b>	12.43	12.86	-0.37
<b>Agosto</b>	12.16	12.86	-0.64
<b>Septiembre</b>	12.55	12.86	-0.25
<b>Octubre</b>	12.13	12.86	-0.67
<b>Noviembre</b>	12.7	12.86	-0.1
<b>Diciembre</b>	17.04	12.86	4.24

Tabla 3-15: Cálculo de potencia de la instalación completa

Se puede observar como el aeropuerto es totalmente sostenible en todos los meses menos en enero y diciembre. Asimismo, en los meses de marzo, abril mayo y junio, se obtiene un excedente de energía. Esta energía ya generada se puede guardar en baterías que serán usadas para los meses de invierno y así obtener una instalación 100% renovable.

La energía que es necesaria almacenar en los meses de enero y febrero son 359.911 kWh y 402.206 kWh, respectivamente. En el mercado existe una gran cantidad de baterías aptas para el almacenaje de energía fotovoltaica, pero las que se adaptan al sistema son las baterías de 15 kWh. Para el diseño se necesitarán 51 y así se obtiene un poco de energía extra para ser redundantes.

### 3.3. Estimación de la reducción de CO<sub>2</sub>

Según el estudio realizado en el proyecto “*La descarbonización en el sector aeronáutico*” [6], por cada kWh generado mediante energía fotovoltaica se está evitando la emisión a la atmósfera de aproximadamente 1 kg de CO<sub>2</sub> en el caso de que se comparase con la producción de energía eléctrica generada a partir del carbón, o aproximadamente de 0,4 Kg de CO<sub>2</sub> en comparación con la producción de energía eléctrica con gas natural. Hoy en día, la producción de energía a partir mediante el carbón es minoritaria debido a la gran cantidad de gases nocivos que se generan para la obtención de este recurso.

Como se ha podido observar en el apartado anterior, la instalación fotovoltaica tanto dentro de la instalación aeroportuaria como en sus proximidades han podido generar el 100% de energía consumida en el Aeropuerto de Sevilla. Como se indica en la Tabla 3-2, el consumo anual considerado es de 20.000.000 kWh, por lo que, si obtenemos esta cantidad de energía de forma limpia, se está evitando la emisión a la atmósfera de 8.000.000 kg de CO<sub>2</sub> anuales.

### 3.4. Análisis económico y de rentabilidad

Una vez se ha determinado la viabilidad del proyecto a carácter técnico, se debe realizar un análisis económico para ver si el proyecto puede llevarse a cabo y si es económicamente rentable. Para ello lo primero se que va a determinar el coste de cada una de las partes que firma el sistema, así como las horas de mano de obra y mantenimiento del sistema. Se va a dividir los cálculos en dos debido a que se va a ver el coste de la instalación en las inmediaciones del aeropuerto y por otro lado en las proximidades de este.

#### 3.4.1. Presupuesto de la instalación del Aeropuerto

Para que se pueda observar correctamente todos los costes de la instalación, se va a poner todos los datos en forma de tabla obteniéndose la Tabla 3-16. El soporte utilizado en el análisis es cualquier soporte genérico que se instale junto al módulo AC-340M. Debido a la gran cantidad de elementos en el sistema, el coste del cableado se ha supuesto un 15% del coste total de los módulos y de los inversores. Por consiguiente, se ha supuesto un coste de mano de obra de 100.000 euros ya que es una gran superficie. Por otro lado, se ha supuesto que se va a realizar un total de 60 mantenimientos totales en la vida útil de la instalación (se ha propuesto 3 mantenimientos al año en una duración de 20 años).

	Cantidad	Precio por unidad (€/unidad)	Precio total (€)
<b>Modulo AC-340M</b>	23.426	211 [25]	4.942.886
<b>Inversor PVS800-057-0250KW</b>	26	60.000 [12]	1.560.000
<b>Soporte</b>	23.426	100	2.342.600
<b>Cableado</b>	-	-	975.433
<b>Mano de obra</b>	-	-	100.000
<b>Mantenimiento</b>	60	500	30.000
<b>Ejecución</b>	-	-	9.950.919
<b>Gastos generales (15%)</b>	-	-	1.492.638
<b>Beneficio Industrial (6%)</b>	-	-	597.055
<b>Subtotal</b>	-	-	12.040.612
<b>IVA (21%)</b>	-	-	2.528.529
<b>TOTAL</b>			<b>14.569.140</b>

Tabla 3-15: Presupuesto campo fotovoltaico en las instalaciones aeroportuarias

Se puede observar que el coste del campo fotovoltaico completo es de 14.569.140 €. En este diseño no se ha tenido en cuenta el costo de las baterías ya que no se ha incluido ninguna.

#### 3.4.2. Presupuesto de la instalación en las proximidades del Aeropuerto

Para la instalación de este diseño, se tendría dos gastos añadidos en comparación con el anterior. Según Jaime Picón [26] el precio de los terrenos rústicos en Sevilla ronda los 40.000 €/hectárea, precio mínimo que se debe pagar para obtener el suelo de las proximidades del aeropuerto. Por otro lado, se debe tener en cuenta

la obtención de baterías para abastecer en los meses de Enero y Febrero, que para el caso del presente estudio son 51 baterías. Realizando un estudio de mercado se ha podido observar que la mayoría de las baterías rondan los 7500 euros por unidad.

Por consiguiente, en la Tabla 3-16 se puede observar en presupuesto de esta instalación.

	<b>Cantidad</b>	<b>Precio por unidad (€/unidad)</b>	<b>Precio total (€)</b>
<b>Modulo AC-340M</b>	14.416	211	3.041.776
<b>Inversor PVS800-057-0250KW</b>	16	60.000	960.000
<b>Soporte</b>	14.416	100	1.441.600
<b>Cableado</b>	NA	NA	600.267
<b>Bateria</b>	51	7.500	382.500
<b>Mano de obra</b>	-	-	100.000
<b>Suelo (hectáreas)</b>	6.22	40.000 [27]	248.800
<b>Mantenimiento</b>	60	500	30.000
<b>Ejecución</b>	-	-	6.804.943
<b>Gastos generales (15%)</b>	-	-	1.020.742
<b>Beneficio Industrial (6%)</b>	-	-	408.297
<b>Subtotal</b>	-	-	8.233.980
<b>IVA (21%)</b>	-	-	1.729.136
<b>TOTAL</b>			<b>9.963.117</b>

Tabla 3-16: Presupuesto campo fotovoltaico en las proximidades del aeroportuario

Se puede observar que el coste de este campo fotovoltaico completo es de 9.963.117 €.

### 3.4.3. Presupuesto total del campo fotovoltaico

Para estudiar la rentabilidad de la instalación del campo fotovoltaico total y así abastecer el 100% de la energía con recursos sostenible, lo primero que se debe hacer es calcular el presupuesto total de la instalación. Para ello se van a sumar todas las cantidades y precios anteriores obteniéndose la Tabla 3-17.

Se observa que el coste total de la implementación del diseño del campo fotovoltaico en el Aeropuerto de Sevilla es de 24.532.257 €.

	<b>Cantidad</b>	<b>Precio por unidad (€/unidad)</b>	<b>Precio total (€)</b>
<b>Modulo AC-340M</b>	37.842	211	7.984.662
<b>Inversor PVS800-057-0250KW</b>	42	60.000	2.520.000
<b>Soporte</b>	37.842	100	3.784.200
<b>Cableado</b>			.1575.699
<b>Bateria</b>	51	7.500	382.500
<b>Mano de obra</b>			200.000
<b>Suelo (hectáreas)</b>	6.22	40000	248.800
<b>Mantenimiento</b>	60	500	60.000
<b>Ejecución</b>			16.755.861
<b>Gastos generales (15%)</b>			2.513.379
<b>Beneficio Industrial (6%)</b>			1.005.352
<b>Subtotal</b>			20.274.592
<b>IVA (21%)</b>			4.257.664
<b>TOTAL</b>			<b>24.532.257</b>

Tabla 3-17: Presupuesto total de la instalación del campo fotovoltaico.

### 3.4.4. Análisis de rentabilidad del proyecto

El precio de la energía se ha disparado en estos años, los gobiernos están intentando regularizar el precio del kWh pero sigue una tendencia ascendente llegando a máximos históricos a medida que pasan los días. El gasto en electricidad en los aeropuertos se ha duplicado en menos de 2 años y no por consumir una cantidad mayor, sino el precio de la energía. Actualmente, el coste medio es de 0.36 euros/kWh, valor muy alto en comparación de años posteriores.

Mediante el presente estudio, se ha pretendido convertir el aeropuerto de Sevilla sostenible, reduciendo drásticamente la cantidad de dióxido de carbono que se expulsa para generar esa cantidad de energía además de reducir los gastos de consumo.

Primero de todo se debe saber el coste energético anual que está teniendo el Aeropuerto de Sevilla. Sabiendo que consume aproximadamente 20.000.000 kWh en un año y multiplicando por el coste medio de la energía 0.36 euros/kWh, sale que el aeropuerto debe gastar un total de 7.200.000 euros anualmente solo en electricidad.

Como se ha indicado en el apartado anterior, el coste de la instalación y su mantenimiento tiene un coste aproximado de 24.532.257 euros. A este valor se le va a añadir un 10% de seguridad debido a que los cálculos son aproximados y para prevenir de posibles fallos y replazos de los equipos. Por lo tanto, se va a considerar que el proyecto tiene un coste de 27.000.000 €. Se puede observar en la Tabla 3-18 como el proyecto empieza a ser rentable a partir del cuarto año después de la inversión, teniendo margen de error ya que según el fabricante, los dispositivos tienen vida útil de 20 años.

<b>Año</b>	<b>Coste de Energía (€)</b>	<b>Coste - Proyecto (€)</b>
<b>1</b>	7.200.000	-19.800.000
<b>2</b>	7.200.000	-12.600.000
<b>3</b>	7.200.000	-5.400.000
<b>4</b>	7.200.000	1.800.000
<b>5</b>	7.200.000	9.000.000
<b>6</b>	7.200.000	16.200.000
<b>7</b>	7.200.000	23.400.000

Tabla 3-18: Estudio de rentabilidad del proyecto

# 4. CERTIFICACIÓN DEL AEROPUERTO

---

Con el crecimiento de las energías renovables, los paneles solares y los aerogeneradores se están desarrollando cada vez más en todas partes del mundo, sobre todo dentro de las instalaciones aeroportuarias o en sus cercanías. Aunque este movimiento se encuentra en auge, la energía renovable aún no está regulada en detalle y esta puede afectar a aspectos importantes de la seguridad y debe ser discutida.

Hay una serie de cuestiones a evaluar con respecto a la instalación de este tipo de energía. Aunque todos los riesgos pueden mitigarse una vez que se cuantifican los problemas que causan, se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Las limitaciones de obstáculos
- Afección a controladores y conductores de la zona de operaciones
- Rutas de acceso para vehículos de bomberos y rescate
- Interferencia con equipos Comunicaciones/Navegación/Vigilancia y equipos meteorológicos
- El reflejo de la luz del sol para las tripulaciones de vuelo

## 4.1. Limitación de obstáculos

Es importante en las instalaciones aeroportuarias que ningún elemento pueda perjudicar a la operación segura y eficiente de las aeronaves. Para ello, existe el capítulo H del “*Easy Access Rules for Aerodromes (Regulation (EU) No 139/2014)*” que habla sobre la superficies de limitación de obstáculos. En el caso de las incorporación de las placas fotovoltaicas, se cumplen todas las especificaciones de limitación de obstáculos debido a que se encuentran en los techos de las instalaciones aeroportuarias. Se debería realizar un estudio de seguridad y ver las limitaciones si se requiere de la incorporación de aerogeneradores.

## 4.2. Afección a controladores y conductores de la zona de operaciones

Hasta el momento, no existe ninguna especificación de certificación que regule la afección de la inclusión de placas fotovoltaicas a los controladores y conductores de la zona de operación, pero es importante realizar un estudio de seguridad para determinar si se puede producir algún deslumbramiento. Esto se realizará en el apartado 4.4 del presente documento.

## 4.3. Interferencias

Hasta la fecha, no se tiene conocimientos de que se requiera una evaluación de la interferencia electromagnética en un proyecto de panel solar de aeropuerto. Debido a que ningún instrumento de comunicación, navegación ni vigilancia se encuentra en los techos de la superficie, las placas fotovoltaicas no tienen ninguna interferencia con estos equipos.

## 4.4. Reflejo de la luz del sol para las tripulaciones de vuelo

El reflejo de luz solar es la fuente más obvia de preocupaciones de seguridad al considerar una instalación de paneles solares en un aeropuerto y en sus inmediaciones. [28] Los dos principales efectos perjudiciales son el destello y el deslumbramiento. La medida de mitigación más simple para paliar estos fenómenos es que los paneles solares generen niveles no deseados de destellos y deslumbramiento gracias a una reorientación. A menudo, un ligero ajuste en su ángulo vertical y/o de alineación dará como resultado una gran reducción en los valores de destello y deslumbramiento, Figura 4-1.

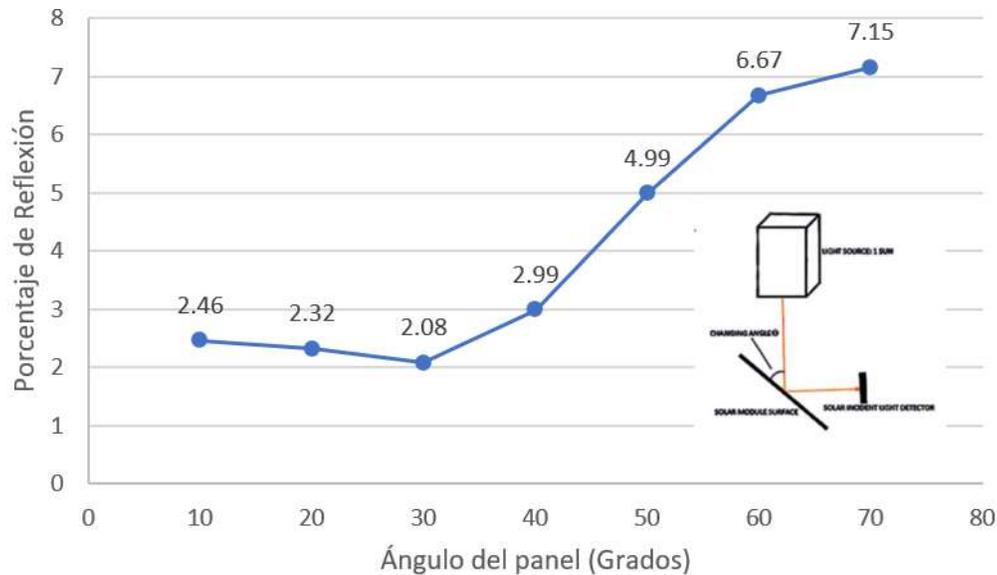


Figura 4-1: Porcentaje de reflexión solar a medida de la variación del ángulo de la placa [29]

En la actualidad, no existen regulaciones específicas que aborden el impacto en la seguridad de los campos de paneles solares en los aeropuertos de Europa. Las autoridades de aviación de varios Estados requieren rutinariamente que los aeropuertos evalúen el reflejo de la luz solar de los paneles solares. Los aeropuertos deben, como parte del proceso de gestión de cambios en su sistema de gestión de la seguridad, considerar todos los riesgos que plantean las granjas de paneles solares en su aeropuerto o adyacentes a este para garantizar la seguridad de la operación en general.

Por otro lado, en el “*Easy Access Rules for Aerodromes (Regulation (EU) No 139/2014)*” regulada por la EASA, en el capítulo M que trata sobre las ayudas visuales para la navegación aparece una especificación de certificación (*CS ADR-DSN.M.615 General* concretamente dentro de *GMI ADR-DSN.M.615 General*) que habla sobre la seguridad para identificar las situaciones en las que el riesgo de deslumbramiento resulta inaceptable. Los apartados que interesa en este estudio son los que se muestra a continuación (En el Anexo B se puede observar la Especificación de certificación completa):

- i) Se realiza una evaluación de la seguridad para identificar las situaciones en las que el riesgo de deslumbramiento resulta inaceptable. Así, se observa que el deslumbramiento representa un riesgo de este tipo en las siguientes situaciones
  - (1) durante la aproximación, especialmente después de que la aeronave haya descendido por debajo de la altura de decisión: el piloto no debe perder ninguna señal visual;
  - (2) en el momento del aterrizaje el piloto no debe ser sorprendido por un destello;
  - (3) durante el rodaje (aterrizaje o despegue), el piloto debe ser capaz de percibir su entorno y detectar cualquier desviación de la línea central: el piloto no debe perder ninguna pista visual.
  - (4) Así pues:
    - i. el deslumbramiento perjudicial debido a la luminancia velada no debe producirse durante la aproximación (un poco antes de la altura de decisión) y el balanceo; y
    - ii. el efecto sorpresa no debe producirse en la toma de contacto.
- j) En lo que respecta a los controladores aéreos, se ha considerado que el deslumbramiento inducido por el efecto velo no debería reducir la percepción visual de las operaciones de las aeronaves en la pista y cerca de ella.
- k) Los elementos aquí expuestos pueden aplicarse a los paneles solares. Se pueden hacer las siguientes suposiciones:
  - a. los paneles solares se inclinan para captar eficazmente la luz solar, conduciendo a una serie de

superficies de sección transversal

- b. el valor máximo de luminancia aceptable se ha fijado en 20 000 cd/m<sup>2</sup>, y
- c. las superficies variaban de 100 m<sup>2</sup> a varias hectáreas

Por consiguiente, se debe realizar un estudio de seguridad para estudiar el riesgo de deslumbramiento que supone la incorporación de la instalación fotovoltaica, Anexo C, “*Estudio de Seguridad para el análisis de deslumbramiento descrito en la CS ADR-DSN.M.615 y GM1 ADR-DSN.M.615*”

## 5. CONCLUSIONES Y PROPUESTA DE MEJORA

---

En el presente capítulo se comentará las conclusiones extraídas tras finalizar el desarrollo de la instalación fotovoltaica tanto dentro del Aeropuerto de Sevilla como en las inmediaciones de este, expuestas en el capítulo 3 del presente documento.

Se ha podido observar que la incorporación de un campo fotovoltaico en las instalaciones aeroporturias es totalmente factible y altamente recomendable, ya que no perjudica ni la seguridad aérea ni la seguridad de los pasajeros si se realiza correctamente. Se ha realizado un estudio de seguridad oficial tal como dice la especificación de certificación y con un ángulo de 30° se produce un deslumbramiento despreciable. En el caso de este estudio se ha supuesto una media de consumo anual de 20.000.000 kWh, valor superior que en años anteriores, pero se ha querido sobredimensionar las instalaciones ante el creciente flujo de pasajeros del Aeropuerto de Sevilla. Para abastecer el 100% de la energía consumida, se ha realizado dos instalaciones separadas ya que dentro de las instalaciones aeroporturias no quedaban superficie suficiente para las placas.

El primer campo fotovoltaico (dentro de las instalaciones del aeropuerto) es capaz de generar en los meses de primavera gran cantidad de energía llegando a abastecer el 82% de la energía necesaria. Por otro lado, en los meses de verano el consumo de energía aumenta debido a las refrigeraciones de las instalaciones, por lo que solo puede abastecer el 70 o 65% del total. En otoño el valor de la potencia necesaria se regulariza pudiendo abastecer el diseño creado aproximadamente el 65%. Por último en los meses de invierno el valor de energía generada ronda los 50% debido principalmente a la irradiancia del sol.

Por otro lado, gracias al segundo campo fotovoltaico (en las proximidades del aeropuerto), el Aeropuerto de Sevilla se puede abastecer el 100% de la energía necesaria menos los meses de enero y febrero. Para ello la opción que se ha propuesto es la incorporación de 51 baterías que van almacenando energía para estos meses. Gracias también a las misma si algún subcampo tiene algún problema, ya sea una avería en el inversor o una placa falla, se puede tirar de esta energía almacenada. Con la implementación de todo lo anterior, se prevee que se reduzca la expulsión a la atmósfera de 8.000.000 kg de CO<sub>2</sub> anual.

Con la compra de todos los elementos necesarios y considerando un factor de seguridad del 10% en el coste del total sale que cuesta realizar el proyecto 27.000.000 euros, valor que en principios parece muy alto. Observando la tendencia que tiene el coste de la energía a medida que va pasando los años considerando una media de 0.36 euros/kWh, el aeropuerto gastar un total de 7.200.000 euros anualmente solo en electricidad, gasto anual demasiado alto.

En cuanto a la rentabilidad del proyecto, se ha observado en el apartado 3.4.4 como el proyecto empieza a ser rentable económicamente a partir del cuarto año. Esto es debido al gran coste que hoy en día tiene la energía, llegando a máximos históricos diariamente.

Asimismo, hoy en día la energía renovable aún no está regulada en detalle para ámbito aeronáutico, pero afecta a aspectos importantes de la seguridad y debe ser discutida. Es por ello por lo que en algunas especificaciones de certificación menciona la necesidad de realizar un estudio de seguridad antes de la incorporación de las placas para cerciorarse que no perjudica ni la seguridad aérea, ni la seguridad de todos los pasajeros.

Aunque parezca peligroso, una propuesta de mejora consistiría en la inclusión de pequeños aerogeneradores que cumplan con la especificación de certificación que se enuncia en el capítulo H del “*Easy Access Rules for Aerodromes (Regulation (EU) No 139/2014)*”, además de cumplir con todas las servidumbres impuestas en el *Real Decreto 584/1972, de 24 de febrero, de servidumbres aeronáuticas*. Con esta instalación eólica, se podría obviar la necesidad de las 51 baterías necesarias para los meses de invierno y poder vender energía excendente en los meses de primavera, verano y otoño.



# REFERENCIAS

---

- [1] F. J. Friedrich, «Energía Solar, vol. 15,» Tenerife, España, 2020.
- [2] C. Tobajas Vázquez, Energía Solar Fotovoltaica, Editorial CanoPina, Murcia, España, 2018.
- [3] L. Arribas de Paz, A. P. Talayero Navales y E. Telmo Martínez, Energía eólica, Prensas de la Universidad de Zaragoza, 2017.
- [4] OACI, Renewable Energy for Aviation: Practical applications to achieve carbon reductions and cost savings, 2017.
- [5] OACI, Doc 9988 Orientación sobre la elaboración de planes de acción de los Estados para actividades de reducción de las emisiones de CO2, Tercera Edición, 2019.
- [6] M. Borràs Valcarce, «La descarbonización en el sector aeronáutico,» Trabajo Fin de Grado, Sabadell, 2020.
- [7] M. González Corbeto y C. E. Rubio Orbegozo, «Estudio de las posibilidades de uso de energías renovables y construcción de una pista sobre el mar en un aeropuerto de tamaño mediano,» Trabajo Fin de Grado, 2019.
- [8] U.S. Energy Information Administration, «U.S. Energy Information Administration,» [En línea]. Available: <https://www.eia.gov>. [Último acceso: 14 09 2021].
- [9] F. Sher, A. Hazafa, K. Marintseva, T. Rasheed, U. Ali, T. Rashid, A. Babu y M. Khzouz, «Fully solar powered Doncaster Sheffield Airport: Energy evaluation, glare analysis and CO2 mitigation,» *Elsevier*, 2021.
- [10] Muller A, et al, «Evolution and feasibility of decentralized concentrating solar thermal power system for modern energy access in rural areas,» *MRS Energy Sustain*, 2016.
- [11] A. Choudhary, S. Bharat Kumar y S. Mishra, «Making Indian airports sustainable by using solar photovoltaic system: analysis of three airports.,» *International Journal of Sustainable Energy*, 2020.
- [12] A. Arce Canga-Argüelles, «Estudio de la Implementación de Energía Fotovoltaica en el Aeropuerto de Sevilla,» Trabajo Fin de Grado, Universidad de Sevilla, Sevilla, 2017.
- [13] S. Sergio Ortega-Alba, «Condiciones para la Implementación de Energías Eólica en Instalaciones Aeroportuarias,» *DYNA*, 2013.
- [14] H. Roshani, S. Dessouky, A. Montoya y A. Papagiannakis, «Energy harvesting from asphalt pavement roadways vehicle-induced,» *Elsevier*, 2016.
- [15] H. Roshani, P. Jagtap, S. Dessouky, A. Montoya y A. Papagiannakis, «Theoretical and Experimental Evaluation of Two Roadway,» *ASCE*, 2018.

- [16] «Real Decreto 584/1972, de 24 de febrero, de servidumbres aeronáuticas [Real 72]».
- [17] OACI, Volumen I, Diseño y operaciones de aeródromos, Séptima edición, julio de 2016.
- [18] Ministerio de Economía, Real Decreto 1663/2000, de 29 de Septiembre, sobre conexión de instalaciones fotovoltaicas a la red de baja tension.
- [19] Ministerio de Economía, Real Decreto 2224/98, de 16 de Octubre, por lo que se establece el certificado de profesionalidad de la ocupación de instalador de sistemas fotovoltaicos y eólicos de pequeña potencia.
- [20] Ministerio de Industria, Energía y Turismo, Real Decreto 900/2015, que establece la obligación de las instalaciones de autoconsumo a contribuir a la financiación de los costes y servicios del sistema en la misma cuantía que el resto de los consumidores.
- [21] AENA, «Plan Director del Aeropuerto de Sevilla».
- [22] AENA, «Estadísticas de tráfico aéreo,» [En línea]. Available: <https://portal.aena.es/es/corporativa/estadisticas-trafico-aereo.html>. [Último acceso: 29 12 2021].
- [23] Meteoblue, «Archivo meteorológico Sevilla,» 2020. [En línea]. Available: [https://www.meteoblue.com/es/tiempo/pronostico/archive/sevilla\\_espa%C3%B1a\\_2510911](https://www.meteoblue.com/es/tiempo/pronostico/archive/sevilla_espa%C3%B1a_2510911). [Último acceso: 29 12 2021].
- [24] DraftLogic, «DraftLogic,» [En línea]. Available: <https://www.daftlogic.com/projects-google-maps-area-calculator-tool.htm#>. [Último acceso: 10 01 2022].
- [25] Solaris, «Solaris,» [En línea]. Available: <https://www.solaris-shop.com/axitec-axipremium-ac-340m-156-72s-340w-mono-solar-panel/>. [Último acceso: 24 01 2022].
- [26] J. P. García, «Valoración Fincas,» [En línea]. Available: <https://valoracionfincas.es/precio-de-los-terrenos-rusticos-en-andalucia-en-2020/#:~:text=El%20precio%20del%20terreno%20para,los%20terrenos%20r%C3%A1sticos%20en%20Andaluc%C3%ADa..> [Último acceso: 22 01 2022].
- [27] S. Atilano Brea, «Aprovechamiento Eólico para producción de electricidad en una instalación offshore.,» Trabajo Fin de Grado, Universidad de Cataluña, 2015.
- [28] S. Sreenath, K. Sudhakar, A. Yusop, E. Cuce y E. Solomin, «Analysis of solar PV glare in airport environment: Potential solutions,» *ELSEVIER*, 2020.
- [29] A. Anurag, J. Zhang, J. Gwamuri y J. M. Pearce, «General Design Procedures for Airport-Based Solar,» *MDPI*, 2017.
- [30] EASA, «Easy Access Rules for Aerodromes (Regulation (EU) No 139/2014)».
- [31] D. Correia y A. Ferreira, «Energy Harvesting on Airport Pavements: State-of-the-Art,» *MPDI*, 2021.
- [32] ENF, [En línea]. Available: <https://es.enfsolar.com/pv/panel-datasheet/crystalline/41643>. [Último acceso: 17 01 2022].



# ANEXO A: CONSUMO AEROPUERTO SEVILLA

El presente informe está recogido a partir del “Estudio de la Implementación de Energía Fotovoltaica en el Aeropuerto de Sevilla” [12] donde se detalla el consumo energético y el gasto económico del Aeropuerto de Sevilla en el año 2016.

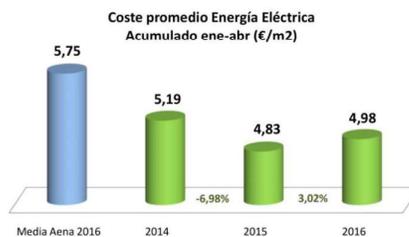
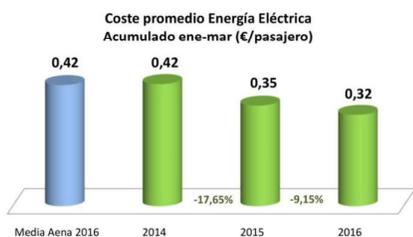
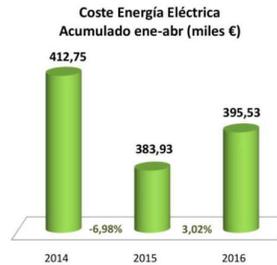
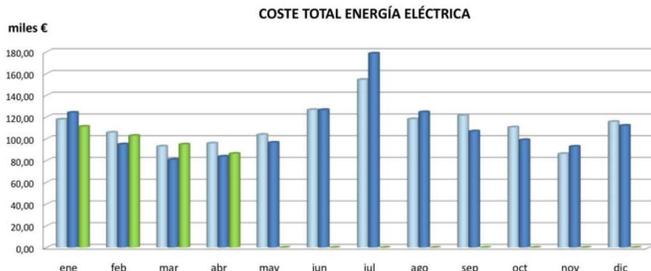
Meses	Consumo (kWh)	Total Gasto Eléctrico (€)
01/16	1.119.229	111.294,03
02/16	1.010.268	102.895,92
03/16	1.025.972	94.947,56
04/16	954.138	86.396,52
05/16	1.168.095	102.668,72
06/16	1.257.860	120.357,55
07/16	1.535.909	160.894,82
08/16	1.422.255	116.370,50
09/16	1.316.103	118.172,88
10/16	1.147.851	104.049,72
11/16	918.344	90.391,30
12/16	1.122.111	116.907,54
TOTAL	13.998.135	1.325.347,06

Esta cantidad total de energía (13.998.135 kWh) fue consumida por un total de 4.620.000 pasajeros con un gasto económico de 1.325.347,06 €.



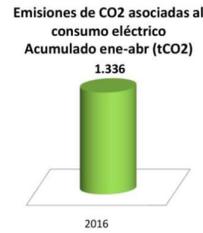
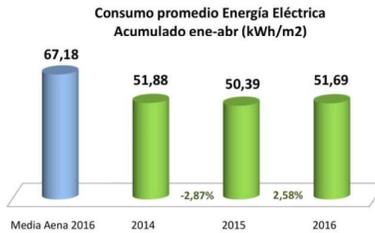
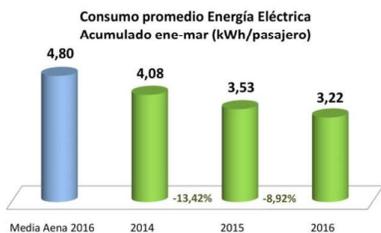
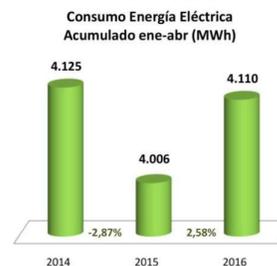
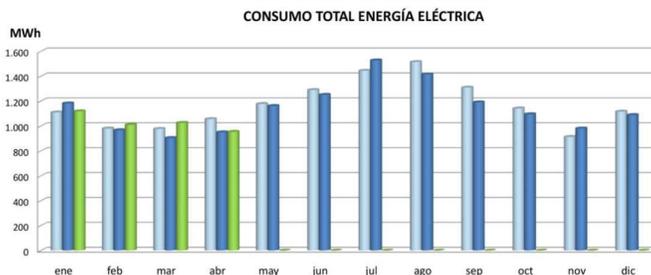
ANÁLISIS DE COSTES DE ENERGÍA ELÉCTRICA. AEROPUERTO DE SEVILLA

		ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Total acumulado abr	
Total	Año 2014 (miles €)	117,92	105,85	93,09	95,90	103,82	126,69	154,43	118,23	121,54	110,66	86,24	115,72	412,75	
	Año 2015 (miles €)	124,16	95,04	80,90	83,83	96,60	126,65	178,60	124,61	106,92	98,94	92,93	112,20	383,93	
	Año 2016 (miles €)	111,29	102,90	94,95	86,40										395,53
	Variación vs año anterior %	-10,4%	8,3%	17,4%	3,1%										3,0%



ANÁLISIS DE CONSUMOS EN ALTA TENSIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA. AEROPUERTO DE SEVILLA

		ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Total acumulado abr	
Total Alta Tensión	Año 2014 (MWh)	1.110	981	978	1.057	1.178	1.290	1.444	1.515	1.310	1.142	914	1.117	4.125	
	Año 2015 (MWh)	1.183	968	905	951	1.162	1.252	1.528	1.415	1.191	1.096	981	1.089	4.006	
	Año 2016 (MWh)	1.119	1.010	1.026	954										4.110
	Variación vs año anterior %	-5,4%	4,4%	13,4%	0,3%										2,6%



# ANEXO B: CS ADR-DSN.M.615 GENERAL <sup>[30]</sup>

## CHAPTER M — VISUAL AIDS FOR NAVIGATION (LIGHTS)

### CS ADR-DSN.M.615 GENERAL

- (a) Elevated approach lights:
- (1) Elevated approach lights and their supporting structures should be frangible except that, in that portion of the approach lighting system beyond 300 m from the threshold:
    - (i) where the height of a supporting structure exceeds 12 m, the frangibility requirement should apply to the top 12 m only; and
    - (ii) where a supporting structure is surrounded by non-frangible objects, only that part of the structure that extends above the surrounding objects should be frangible.
  - (2) When an approach light fixture or supporting structure is not in itself sufficiently conspicuous, it should be suitably marked.

- (b) Elevated lights:

Elevated runway, stopway, and taxiway lights should be frangible. Their height should be sufficiently low to preserve clearance for propellers and for the engine pods of jet aircraft.

- (c) Surface lights:

- (1) Light fixtures inset in the surface of runways, stopways, taxiways, and aprons should be so designed and fitted as to withstand being run over by the wheels of an aircraft without damage either to the aircraft or to the lights themselves.
- (2) The temperature produced by conduction or radiation at the interface between an installed inset light and an aircraft tire should not exceed 160°C during a 10-minute period of exposure.

- (d) Light intensity and control:

- (1) The intensity of runway lighting should be adequate for the minimum conditions of visibility and ambient light in which use of the runway is intended, and compatible with that of the nearest section of the approach lighting system when provided.
- (2) Where a high-intensity lighting system is provided, a suitable intensity control should be incorporated to allow for adjustment of the light intensity to meet the prevailing conditions. Separate intensity controls or other suitable methods should be provided to ensure that the following systems when installed, can be operated at compatible intensities:
  - (i) approach lighting system;
  - (ii) runway edge lights;
  - (iii) runway threshold lights;
  - (iv) runway end lights;
  - (v) runway centre line lights;
  - (vi) runway touchdown zone lights; and
  - (vii) taxiway centre line lights.

- (3) On the perimeter of and within the ellipse defining the main beam in CS ADR-DSN.U.940, the maximum light intensity value should not be greater than three times the minimum light intensity value measured in accordance with CS ADR-DSN.U.940.

On the perimeter of and within the rectangle defining the main beam in CS ADR- DSN.U.940, the maximum light intensity value should not be greater than three times the minimum light intensity value measured in accordance with CS ADR-DSN.U.940.

## *GMI ADR-DSN.M.615 General*

- a) Aeronautical ground lights near navigable waters should be taken into consideration to ensure that the lights do not cause confusion to mariners.
- b) In dusk or poor visibility conditions by day, lighting can be more effective than marking. For lights to be effective in such conditions or in poor visibility by night, they should be of adequate intensity. To obtain the required intensity, it should usually be necessary to make the light directional, in which case the arcs over which the light shows should be adequate and so orientated as to meet the operational requirements. The runway lighting system should be considered as a whole, to ensure that the relative light intensities are suitably matched to the same end.
- c) While the lights of an approach lighting system may be of higher intensity than the runway lighting, it is good practice to avoid abrupt changes in intensity as these could give a pilot a false impression that the visibility is changing during approach.
- d) The conspicuity of a light depends on the impression received of contrast between the light and its background. If a light is to be useful to a pilot by day when on approach, it should have an intensity of at least 2 000 or 3 000 cd, and in the case of approach lights an intensity of the order of 20 000 cd is desirable. In conditions of very bright daylight fog it may not be possible to provide lights of sufficient intensity to be effective.
- e) On the other hand, in clear weather on a dark night, an intensity of the order of 100 cd for approach lights and 50 cd for the runway edge lights may be found suitable. Even then, owing to the closer range at which they are viewed, pilots have sometimes complained that the runway edge lights seemed unduly bright.
- f) In fog the amount of light scattered is high. At night this scattered light increases the brightness of the fog over the approach area and runway to the extent that little increase in the visual range of the lights can be obtained by increasing their intensity beyond 2 000 or 3 000 cd. In an endeavour to increase the range at which lights would first be sighted at night, their intensity should not be raised to an extent that a pilot might find excessively dazzling at diminished range.
- g) From the foregoing should be evident the importance of adjusting the intensity of the lights of an aerodrome lighting system according to the prevailing conditions, so as to obtain the best results without excessive dazzle that would disconcert the pilot. The appropriate intensity setting on any particular occasion should depend both on the conditions of background brightness and the visibility.
- h) Assessment on dazzle in the aerodrome vicinity:
  - a. Human vision is a complex mechanism using both eye and brain. Even though this mechanism is quite handled for eye, there is still a lack of knowledge on the interpretation of it by the brain. Thus, vision varies from one human being to another.
  - b. The field of view is defined by the area perceived by eyes. The perception of details is based on the luminance ratio between elements of the scene, taking into account spatial

distribution. Luminance and contrast are key elements of vision mechanism.

- c. Four sectors can be identified in the field of view (FOV):
- i. sensation field, corresponding to the absolute boundaries of FOV; it opens up to approximately  $90^\circ$  on each side of the eye direction;
  - ii. visibility field, which is narrower and enables the perception of an object; it opens up to  $60^\circ$ ;
  - iii. conspicuity field, which enables the recognition, it opens up to  $30^\circ$ ;
  - iv. working conspicuity field, which is further tightly centred on the eye direction ( $1^\circ$  to  $2^\circ$ ); it enables the identification and is the working area of the vision.

It is reminded that the retina is composed in its centre by cone cells (that see colours and details) and at the periphery by rod cells (that perceive movements and change of state).

- i) A safety assessment is conducted in order to identify situations where the risk of dazzling becomes unacceptable. Thus, it is noted that dazzle represents such a risk in the following situations:
- a. during approach, especially after the aircraft has descended below the decision height: the pilot should not lose any visual cue;
  - b. at touchdown the pilot should not be surprised by a flash;
  - c. during rolling (landing or take-off), the pilot should be able to perceive his environment and detect any deviation from the centre line: the pilot should not lose any visual cue.
  - d. Thus:
    - i. prejudicial dazzle due to veiling luminance should not occur during approach (slightly before the decision height) and rolling; and
    - ii. surprise effect should not occur at touchdown.
- j) Regarding air traffic controllers, it has been considered that dazzle induced by veiling effect should not reduce the visual perception of aircraft operations on, and close to the runway.
- k) The elements here above can be applied to solar panels. The following assumptions can be made:
- a. solar panels are inclined so as to efficiently capture the sunlight, conducting to a range of cross section surfaces;
  - b. the maximum acceptable luminance value has been fixed to  $20\,000\text{ cd/m}^2$ ; and
  - c. the surfaces varied from  $100\text{ m}^2$  to several hectares.
- l) It is assumed that the aircraft maintains precisely its trajectory whereas in reality the approach is conducted into a conical envelop around the expected trajectory.

# ANEXO C: ESTUDIO DE SEGURIDAD

---

Estudio de Seguridad para el análisis de  
deslumbramiento descrito en la  
CS ADR-DSN.M.615  
GM1 ADR-DSN.M.615

Referencia: CS ADR-DSN.M.615  
GM1 ADR-DSN.M.615



Autor: Jesús Rosete Parro

## 1. Índice de contenidos

1. Índice de contenidos
2. Objeto del estudio
3. Características generales del aeropuerto
4. Definición detallada del alcance del estudio
5. Análisis de la seguridad operacional
6. Aplicación de medidas de mitigación
7. Conclusión
8. Documentación justificativa

## 2. Objeto del estudio

De acuerdo con el Real Decreto 862/2009, de 14 de mayo, por el que se aprueban las normas técnicas y de diseño y operación de aeródromos de uso público y se regula la certificación de los aeropuertos de competencia del Estado, y en particular con el Reglamento de Certificación que se aprueba, el gestor aeroportuario del Aeropuerto de Sevilla ha solicitado el inicio del procedimiento de certificación de acuerdo con el Capítulo IV del mencionado reglamento. Dentro de la documentación técnica que ha de ser aportada y definida en el artículo 15, apartado c), se adjunta este estudio aeronáutico al solicitarse alguna de las exenciones definidas en el artículo 7.

Existiendo como parte del expediente una solicitud de exención fundada en que el cumplimiento del requisito CS ADR-DSN.M.615/GM1 ADR-DSN.M.615, "General", este documento acredita que el escenario existente y las medidas alternativas propuestas garantizan suficientemente el mantenimiento de un nivel de seguridad operacional aceptable de forma que la Agencia Estatal de Seguridad Aérea pueda conceder exenciones al cumplimiento del mencionado requisito.

## 3. Características generales del aeropuerto

El Aeropuerto de Sevilla se encuentra localizado a unos 10 Km al NE de la ciudad de Sevilla, en el Km 533 de la carretera N-IV Madrid-Cádiz. El aeropuerto pertenece a los términos municipales de Sevilla y La Rinconada y ocupa una superficie aproximada de 893 Ha. Sus coordenadas geográficas son 37°25'05" de latitud norte 5°53'56" longitud oeste.

La dirección predominante del viento es SW-NE (05-23), pero debido a la localización de la ciudad de Sevilla, esta dirección se utiliza como calle de rodaje, denominándose la pista en la dirección 09-27.

El horario del aeropuerto es de 4.30 am a 23.00 pm en verano (está cerrado por las noches) y de 5.30 am a 24.00 pm en invierno

## 4. Definición detallada del alcance del estudio

### 4.1. Descripción detallada

La CS ADR-DSN.M.615 concretamente en la GM1 ADR-DSN.M.615 apartados i, j y k enuncia la necesidad de realizar un estudio de seguridad para identificar las situaciones en las que el riesgo de deslumbramiento resulta inaceptable. Así, se estudia si el deslumbramiento representa un riesgo de este tipo durante la aproximación, especialmente después de que la aeronave haya descendido por debajo de la altura de decisión, en el momento del aterrizaje el piloto no debe ser sorprendido por un destello y durante el rodaje (aterrizaje o despegue).

### 4.2. Análisis de viabilidad de la subsanación

Se justifica el desarrollo del estudio de seguridad porque la incorporación de placas fotovoltaicas no figura en específico en la normativa Easy Access Rules for Aerodromes (Regulation (EU) No 139/2014). El siguiente estudio de seguridad demuestra que se alcanza un nivel de seguridad suficiente para su incorporación.

### 4.3. Identificación de Requisitos Esenciales asociados.

El único requisito esencial asociado es el no deslumbramiento (o deslumbramiento mínimo) de las partes afectas en la inmediaciones del aeropuerto.

## 5. Análisis de seguridad operacional

### 1.1. Peligros identificados

Un mal posicionamiento de las placas fotovoltaicas puede ocasionar deslumbramiento que afecta a la operación segura de los pilotos y controladores aéreos provocando una pérdida de visión momentánea.

### 1.2. Análisis de accidentes e incidentes

No se localizan incidentes ni accidentes ocasionados por la situación de no cumplimiento o factores relacionados con la misma

### 1.3. Hipótesis de partida

Una correcta colocación de la placa fotovoltaica (con orientación y ángulo adecuado) puede no afectar a las operaciones de la aeronaves ni a los controladores aéreos.

- Orientación: Si se orienta las placas fotovoltaicas hacia la pista de despegue
- Ángulo: Se ha demostrado mediante estudios que un ángulo de placa de aproximadamente 30/35° posee una reflexión de menos del 2%, considerandolo aceptable.

### 1.4. Factores relevantes

Debido al escenario físico se observa que el clima de Sevilla permite una buena visibilidad casi los 365 días/año. Por otro lado, las aeronaves comerciales representan un 80% de las operaciones totales.

### 1.5. Análisis de Riesgos

Se presentan en este punto los riesgos que derivan de la situación analizada.

### 1.5.1. Clasificación y agrupación de riesgos

Peligros	Defensas	Factores	Riesgos potenciales	Riesgos finales
Campos fotovoltaicos puede ocasionar deslumbramiento en las instalaciones aeroportuarias	Un buen análisis de su colocación y ángulo reduce los riesgos drásticamente.	Buena visibilidad en la mayoría del año.	Pérdida de visión momentánea	Reducción de márgenes de seguridad

### 1.5.2. Evaluación de la severidad

	OPERACIÓN	TRIPULACIÓN	ATC
<b>CATASTRÓFICO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Colisión</li> <li>Pérdida de fuselaje</li> <li>Dstrucción de equipamiento</li> <li>Pérdida total de control</li> <li>Múltiples muertes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Muertos</li> <li>Heridos graves</li> <li>Incapacitados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pérdida total de separación</li> <li>Ningún mecanismo independiente puede prevenir esa severidad</li> </ul>
<b>PELIGROSO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gran reducción de márgenes de seguridad o capacidades funcionales de la aeronave</li> <li>Lesiones serias, con heridos graves</li> <li>Daños mayores al equipamiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Excesiva carga de trabajo que no puede asegurar que la tripulación pueda realizar sus tareas adecuadamente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gran reducción de la separación sin control total de la tripulación o ATC</li> <li>Desviación de una o más aeronaves de su trayectoria deseada provocando maniobras bruscas de evasión</li> </ul>
<b>MAYOR</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducción significativa de márgenes de seguridad o capacidades funcionales de la aeronave</li> <li>Lesiones a las personas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Significativo aumento de la carga de trabajo que provoque una reducción en la habilidad del operador en responder a condiciones operativas adversas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gran reducción de la separación con control total de la tripulación o ATC.</li> <li>Pequeña reducción de la separación sin control total de la tripulación o ATC</li> </ul>
<b>MENOR</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducción leve de márgenes de seguridad o capacidades funcionales de la aeronave: interferencias, limitaciones operativas, utilización de procedimientos de emergencia, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Leve aumento de la carga de trabajo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Leve reducción de la separación o capacidad de control de la tripulación o ATC</li> </ul>
<b>SIN EFECTO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sin efectos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sin efectos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Leve aumento de la carga de trabajo ATC</li> </ul>

De acuerdo con la siguiente matriz proporcionada por AESA, se realiza una evaluación de la severidad. Se observa que el riesgo asociado al peligro es de Peligroso/Mayor.

### 1.5.3. Evaluación de la probabilidad

PROBABILIDAD	DEFINICIÓN CUALITATIVA	DEFINICIÓN CUANTITATIVA
5	<b>Frecuente</b>	Probable que ocurra muchas veces (ha ocurrido frecuentemente)
4	<b>Razonablemente Probable</b>	Probable que ocurra algunas veces (ha ocurrido infrecuentemente)
3	<b>Remoto</b>	Improbable, pero es posible que ocurra (ocurre raramente)
2	<b>Extremadamente Remoto</b>	Muy improbable que ocurra (no se conoce que haya ocurrido)
1	<b>Extremadamente Improbable</b>	Casi inconcebible que el evento ocurra

El riesgo asociado tiene una probabilidad de tipo Extremadamente remoto.

### 1.5.4. Matriz de clasificación de riesgos

Gracias a la tabla de evaluación de riesgos la cual combina la severidad y la probabilidad de riesgos en cuestión, se demuestra que el riesgo asociado es de tipo bajo/medio. Por lo tanto puede ser aceptado por el aeropuerto sin recurrir a ninguna acción para eliminarlo.

		A	B	C	D	E
		CATASTRÓFICO	PELIGROSO	MAYOR	MENOR	NINGÚN EFECTO
5	FRECUENTE	RIESGO ALTO	RIESGO ALTO	RIESGO ALTO	RIESGO MEDIO	RIESGO BAJO
4	RAZONABLEMENTE PROBABLE			RIESGO ALTO	RIESGO MEDIO	
3	REMOTO		RIESGO MEDIO	RIESGO MEDIO		
2	EXTREMADAMENTE REMOTO	RIESGO MEDIO	RIESGO BAJO	RIESGO BAJO		
1	EXTREMADAMENTE IMPROBABLE	RIESGO MEDIO	RIESGO BAJO	RIESGO BAJO	RIESGO BAJO	

## 6. Aplicación de medidas de mitigación

Como medida mitigadora se propone que se realice cada cierto periodo de tiempo un estudio de seguridad para analizar la evolución de la instalación. Por otro lado, debido a la incorporación de los mismos en diferentes localizaciones europeas, establecer un criterio común y documentarlo creando una normativa europea, a parte de la creación de una especificación de certificación (CS) específica para el uso de las placas fotovoltaicas.

## 7. Conclusión

De acuerdo con el análisis de riesgos realizados, este estudio acredita la posibilidad de la inclusión de campo fotovoltaicos en las instalaciones del Aeropuerto de Sevilla, así como las medidas mitigadoras y acciones correctoras propuestas anteriormente que garantizan el nivel de seguridad operacional establecidos en el Sistema de Gestión de la Seguridad Operacional del Aeropuerto de Sevilla.

## 8. Documentación justificativa

Easy Access Rules for Aerodromes (Regulation (EU) No 139/2014). EASA.

Easy Access Rules for the Basic Regulation (Regulation (EU) 2018/1139)

Plan Director del Aeropuerto de Sevilla

AIS-España. AIP LEZL AD 2

Referencias del TFM actual

