

DIRECCIÓN GENERAL DE AERONÁUTICA CIVIL

GUÍA TÉCNICA

**ASPECTOS A CONSIDERAR PARA LA ELABORACIÓN DEL ESTUDIO DE
REFLECTIVIDAD SOLAR E INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA PARA
PROYECTOS FOTOVOLTAICOS EN ZONAS AEROPORTUARIAS**

DEPARTAMENTO LOGÍSTICA
SUBDEPARTAMENTO SISTEMAS
SECCIÓN INGENIERÍA Y PROYECTOS

CONTROL DEL DOCUMENTO

APROBADO POR

Versión	Aprobado por	Cargo
1	Edmundo Cortés Mancilla	Jefe Subdepartamento Sistemas

REVISADO POR

Versión	Revisado por	Cargo
1	Javier Flores Saldía	Jefe Sección Ingeniería y Proyectos

REALIZADO POR

Versión	Realizado por	Cargo
1	Matías Azócar Rojas	Ingeniero de Proyectos de Sistemas

HISTORIAL DE REVISIONES

Versión	Fecha	Descripción del cambio
1	Julio 2026	Versión inicial del documento.

1. Objetivo General	4
2. Estudio de Reflectividad Solar (Deslumbramiento / Glare)	5
2.1 Antecedentes y Base de Datos.....	5
2.1.1 Información general y geográfica del proyecto	5
2.1.2 Base de datos	5
2.2 Información y Datos Requeridos.....	5
2.3 Metodología Requerida	6
2.3.1 Software de simulación	6
2.3.2 Procedimiento de simulación paso a paso	6
2.3.3 Criterios de aceptación.....	7
2.4 Resultados Esperados.....	7
3. Estudio de Interferencia Electromagnética (EMI)	9
3.1 Objetivo del Estudio.....	9
3.2 Información y Datos Requeridos.....	9
3.2.1 Catastro de equipos generadores de EMI	9
3.2.2 Ubicación espacial relativa	9
3.3 Metodología Requerida	10
3.3.1 Evaluación de la Zona de Protección de las Radioayudas	10
3.3.2 Cálculo teórico de propagación de ruido electromagnético	10
3.3.3 Análisis de reflexiones multi-trayecto (Multipath).....	11
3.4 Resultados Esperados.....	11
4. Entregables.....	13

1. Objetivo General

El objetivo del presente documento es especificar los contenidos mínimos esperados de un Estudio de Reflectividad Solar e Interferencia Electromagnética, en el contexto de la evaluación de proyectos solares fotovoltaicos (PFV) ubicados en las cercanías de aeródromos, aeropuertos y rutas de navegación aérea.

Su propósito fundamental es garantizar que la construcción y operación de la planta fotovoltaica no comprometa la seguridad operacional de la aviación, ya sea por efectos de deslumbramiento visual (glare) o por degradación de las señales de radioayudas y comunicaciones.

Este documento no establece una norma rígida, sino lineamientos técnicos que:

- Faciliten la confección de los estudios por parte de los desarrolladores.
- Agilicen la revisión y aprobación por parte de la autoridad aeronáutica.
- Reduzcan el número de iteraciones durante el proceso de evaluación.



Requisito excluyente

La aprobación de ambos estudios por parte de la autoridad competente es un requisito previo y excluyente al inicio de las obras de construcción. Los informes deberán ser firmados y validados por el profesional responsable o jefe/encargado del área competente, de acuerdo con sus funciones y ámbito de responsabilidad técnica, asegurando la correcta elaboración y validación de los antecedentes presentados.

2. Estudio de Reflectividad Solar (Deslumbramiento / Glare)

A continuación, se indican los contenidos mínimos esperados en un Estudio de Reflectividad Solar para proyectos fotovoltaicos en entornos aeroportuarios.

2.1 Antecedentes y Base de Datos

El desarrollador del estudio deberá proporcionar un conjunto completo de antecedentes técnicos, planimetría y bases de datos. Esta información es fundamental para validar los resultados de las simulaciones presentadas.

2.1.1 Información general y geográfica del proyecto

- Coordenadas geográficas precisas (sistema WGS-84) que definan los polígonos correspondientes al parque fotovoltaico.
- Archivos topográficos que contengan la altimetría detallada del terreno del proyecto y su entorno inmediato (mínimo 5 km de radio).
- Planos de disposición general (Layout) que evidencien la distancia y relación espacial con las pistas (cabeceras), rutas de aproximación, torres de control y vías terrestres aledañas.

2.1.2 Base de datos

- **Datos Solares y Meteorológicos:** Registros de radiación solar de la zona (global, directa y difusa), cálculos de la trayectoria solar durante todo el año y datos meteorológicos históricos que incluyan visibilidad promedio y nubosidad.
- **Especificaciones de los Paneles:** Fichas técnicas que indiquen el tipo de módulo, detalles del tratamiento antirreflectante del cristal y su coeficiente de reflectancia (albedo superficial).
- **Parámetros de Montaje y Seguimiento:** Diseño de montaje indicando la inclinación (tilt) y orientación (azimut) de los paneles, tipo de estructura (fija o con sistema de seguimiento de 1 o 2 ejes), detallando los algoritmos de retroceso (backtracking) si corresponde.
- Inventario de otras estructuras metálicas de la planta con potencial reflectante.

2.2 Información y Datos Requeridos

El modelo de simulación deberá incluir, como mínimo, las siguientes variables:

Categoría	Variables requeridas
Ubicación y Topografía	Coordenadas WGS-84 (polígonos), altimetría detallada del terreno y entorno, distancia a pistas, rutas de aproximación y torres de control.
Condiciones Solares	Radiación solar (global, directa, difusa), trayectoria solar para solsticios, equinoccios y todo el año.
Meteorología	Visibilidad promedio histórica, frecuencia de días despejados/nublados.
Sistema Fotovoltaico	Tipo de módulo, tratamiento antirreflectante, coeficiente de reflectancia, inclinación, azimut, tipo de estructura (fija/tracker), algoritmo de backtracking.

Se debe evaluar rigurosamente el riesgo de deslumbramiento en los siguientes receptores:

- **Tráfico aéreo:** Pilotos en fases críticas de aproximación, despegue y patrones de vuelo hasta 2 Millas Náuticas de las cabeceras.
- **Infraestructura aeroportuaria:** Controladores aéreos en la Torre de Control (TWR), personal en instalaciones RADAR, VOR, ILS, PSR/SSR, según corresponda.
- **Tráfico terrestre:** Conductores en carreteras adyacentes y vías de servicio del aeropuerto/aeródromo.

2.3 Metodología Requerida

La metodología del estudio debe seguir un proceso riguroso y reproducible. A continuación, se describe el procedimiento mínimo exigido:

2.3.1 Software de simulación

El análisis debe realizarse utilizando software especializado y reconocido internacionalmente para el cálculo de deslumbramiento aeronáutico. Se aceptarán, entre otros:

Software	Descripción
SGHAT (Solar Glare Hazard Analysis Tool)	Herramienta validada por la FAA para el análisis de deslumbramiento en entornos aeroportuarios. Referencia principal recomendada.
ForgesSolar	Software europeo con metodología conforme a EASA. Aceptado para proyectos en jurisdicciones ICAO.
Equivalente validado	Cualquier software con metodología documentada, validada y reconocida por una autoridad aeronáutica nacional o internacional. Se debe adjuntar documentación de validación.

2.3.2 Procedimiento de simulación paso a paso

El estudio debe documentar explícitamente los siguientes pasos:

Paso 1. Definición del área de estudio y los receptores críticos.

Identificar y georreferenciar todos los receptores relevantes: cabeceras de pista, Torre de Control, antenas de radioayuda (VOR, ILS, DME, PSR/SSR), y puntos de observación en rutas de aproximación a 2 NM mínimo.

Paso 2. Modelado geométrico del sistema fotovoltaico.

Ingresar la geometría completa del parque: polígonos de paneles, inclinación, azimuth, altura sobre el suelo y tipo de montaje. Para trackers, modelar la posición en cada hora del día incluyendo el algoritmo de backtracking.

Paso 3. Simulación temporal anual.

Ejecutar la simulación con resolución temporal mínima de 1 minuto para cada día del año. Registrar la posición solar (azimut y elevación) para cada instante.

Paso 4. Cálculo de ángulos de reflexión y ocularidad.

Para cada instante en que exista reflexión hacia un receptor, calcular: (a) el ángulo de incidencia del haz reflejado sobre el ojo del observador, (b) la irradiancia del haz reflejado, y (c) si el haz se encuentra dentro del campo visual del observador (cono de 70° para pilotos en fase de aproximación).

Paso 5. Clasificación del deslumbramiento según criterios FAA/EASA.

Aplicar los umbrales de irradiancia definidos en la normativa de referencia para clasificar cada evento de reflexión en las categorías establecidas.

Paso 6. Evaluación de medidas de mitigación (si aplica).

En caso de detectarse eventos de deslumbramiento de nivel 2 o superior, se debe reiterar la simulación incorporando las medidas de mitigación propuestas y demostrar cuantitativamente la reducción del impacto.

2.3.3 Criterios de aceptación

Los resultados de la simulación serán evaluados conforme a los siguientes umbrales:

Nivel	Irradiancia (W/m ²)	Clasificación y criterio
Nivel 0	< 10	Sin impacto relevante. Aceptable sin restricciones.
Nivel 1	10 – 100	Resplandor (glare) sin daño ocular. Aceptable si la duración acumulada no supera 30 min/año por receptor.
Nivel 2	100 – 10.000	Daño ocular temporal posible. Requiere medidas de mitigación y re-evaluación.
Nivel 3	> 10.000	Potencial de daño ocular permanente. No admisible. El proyecto debe ser rediseñado.

** Referencia normativa**

FAA Order 1050.1F (Environmental Impacts), FAA Solar Glare Hazard Analysis Tool (SGHAT) User Manual, EASA CS-ADR-DSN Issue 8, OACI Anexo 14 – Aeródromos, Volumen I.

2.4 Resultados Esperados

El informe final del Estudio de Reflectividad Solar deberá incluir obligatoriamente:

- **Mapas de calor / Zonas de deslumbramiento:** Gráficos georreferenciados que identifiquen la intensidad (W/m^2) y duración (minutos al día / horas al año) del deslumbramiento para cada receptor evaluado.
- **Diagramas solares anuales:** Representación de la trayectoria solar con marcación de los períodos horarios en que se producen eventos de reflexión significativos hacia cada receptor.
- **Tabla de eventos críticos:** Listado con fecha, hora, duración, irradiancia estimada y receptor afectado para todos los eventos de nivel 1 o superior.
- **Clasificación del impacto:** Determinación del nivel de deslumbramiento según los criterios de aceptación definidos en la sección 2.3.3.
- **Archivos de simulación:** Los archivos fuente generados por el software (formatos nativos del programa utilizado) deberán ser adjuntados como anexo al informe.

En caso de que el estudio detecte eventos de nivel 1 o superior, se deberá incluir además un Plan de Mitigación que contemple, según corresponda:

- **Modificación de la inclinación u orientación:** Ajuste del tilt o azimut de los paneles en las zonas críticas identificadas.
- **Barreras físicas:** Implementación de pantallas opacas, barreras vegetales o estructuras de sombra selectiva.
- **Modificación del algoritmo de seguimiento:** Programación de posiciones de seguridad (stow position) para los trackers durante los períodos horarios de riesgo identificados.
- **Tratamiento superficial adicional:** Uso de revestimientos antirreflectantes de mayor especificación en los módulos de las zonas críticas.

3. Estudio de Interferencia Electromagnética (EMI)

3.1 Objetivo del Estudio

Asegurar la Compatibilidad Electromagnética (CEM) de la planta fotovoltaica con los sistemas críticos de navegación, vigilancia y comunicaciones del aeropuerto/aeródromo. Se debe demostrar que los equipos eléctricos y electrónicos de la planta no generarán ruido radioeléctrico que degrade los siguientes sistemas:

Sistema	Sigla	Función crítica
Aterrizaje por Instrumentos	ILS (LOC/GS)	Guía de precisión en aproximación final. Banda 108–112 MHz (LOC) y 329–335 MHz (GS).
Radiofaro Omnidireccional	VOR	Navegación aérea en ruta. Banda 108–117,95 MHz.
Equipo Medidor de Distancia	DME	Medición de distancia oblicua aeronave-estación. Banda 960–1215 MHz.
Radar Primario	PSR	Vigilancia de tráfico aéreo. Banda L (1–2 GHz) o S (2–4 GHz).
Radar Secundario	SSR	Identificación de aeronaves (transponder). Banda 1030/1090 MHz.
Comunicaciones VHF	VHF COM	Comunicación voz tierra-aire. Banda 118–136,975 MHz.

3.2 Información y Datos Requeridos

3.2.1 Catastro de equipos generadores de EMI

- **Inversores:** Fichas técnicas completas con certificaciones de emisiones electromagnéticas (normas CISPR 11, CISPR 32, IEC 61000-6-4 o equivalentes). Indicar potencia nominal, topología (string, central, microinversor), tecnología de conmutación y frecuencia de switching.
- **Transformadores:** Especificaciones del transformador de MT/BT y de la subestación eléctrica. Incluir nivel de emisiones en bandas de frecuencia de las radioayudas.
- **Motores de trackers:** Fichas técnicas y certificaciones EMC de los actuadores y drivers de los sistemas de seguimiento solar.
- **Red eléctrica interna:** Diseño de la red de media y baja tensión dentro de la planta (trayectoria de cables, longitudes, configuración y profundidad de enterramiento).
- **Líneas de evacuación:** Diseño de las líneas de transmisión de evacuación eléctrica (tipo de conductor, longitud, altura, orientación y paralelismo con estructuras del aeropuerto/aeródromo).

3.2.2 Ubicación espacial relativa

- **Distancias a radioayudas:** Distancia exacta (en metros) desde cada inversor, subestación y línea de evacuación hasta la antena de cada radioayuda presente en el aeropuerto/aeródromo.

- **Análisis de Línea de Vista (LOS):** Evaluación de si existe visibilidad directa (Line of Sight) entre las fuentes de emisión de la planta y cada antena receptora aeroportuaria, considerando la topografía del terreno y las obstrucciones naturales o artificiales existentes.
- **Plano de emplazamiento:** Mapa georreferenciado que muestre simultáneamente la planta fotovoltaica, las antenas de todas las radioayudas y las zonas de protección electromagnética de cada sistema.

3.3 Metodología Requerida

La metodología del Estudio de Interferencia Electromagnética deberá documentar explícitamente las siguientes etapas:

3.3.1 Evaluación de la Zona de Protección de las Radioayudas

Para cada radioayuda presente en el aeropuerto/aeródromo, se deberá:

- Identificar y graficar las zonas de protección críticas definidas en el Anexo 10 de OACI (Volumen I) y en los estándares ICAO Doc 8071.
- Verificar si algún componente de la planta fotovoltaica (inversor, subestación, líneas de transmisión/distribución) se ubica dentro de dichas zonas.
- En caso de superposición, justificar técnicamente la ausencia de interferencia o proponer las medidas de mitigación correspondientes.

3.3.2 Cálculo teórico de propagación de ruido electromagnético

El estudio debe demostrar mediante cálculo analítico o simulación que el ruido radiado por los equipos de la planta, al llegar a la ubicación de las antenas aeronáuticas, se encuentra por debajo del umbral de sensibilidad de los receptores. El procedimiento mínimo es:

Paso 7. Caracterización de las emisiones de la fuente.

A partir de las fichas técnicas y certificaciones CISPR de los inversores, determinar el nivel de emisión electromagnética radiada (en dB μ V/m a 10 m de distancia) en cada una de las bandas de frecuencia de las radioayudas presentes en el aeropuerto/aeródromo.

Paso 8. Selección del modelo de propagación.

Seleccionar el modelo de propagación adecuado según la frecuencia y la distancia involucrada. Para distancias y frecuencias típicas de este tipo de instalaciones, se recomienda el uso del modelo de propagación en espacio libre (Free Space Path Loss - FSPL) como cota superior conservadora (peor escenario), complementado con modelos de atenuación por terreno (ITU-R P.526, P.1546 o equivalentes) si la topografía lo permite.

Paso 9. Cálculo de la intensidad de campo en la antena receptora.

Calcular la intensidad de campo eléctrico (en dB μ V/m) en la ubicación de cada antena aeronáutica, considerando: nivel de emisión de la fuente, pérdidas de propagación, ganancia de antena de la fuente y factores de apantallamiento natural o artificial.

Paso 10. Comparación con umbral de protección.

Comparar el nivel calculado con el umbral de protección (immunity level) de cada sistema aeronáutico receptor, conforme a los valores definidos en OACI Anexo 10, Volumen I y en el documento ICAO Doc 9051 (Electromagnetic Compatibility Manual). El nivel calculado deberá ser al menos 6 dB inferior al umbral de protección para cumplir con el criterio de no interferencia.

3.3.3 Análisis de reflexiones multi-trayecto (Multipath)

Los paneles fotovoltaicos constituyen grandes superficies reflectantes de señales de radiofrecuencia. Este análisis debe demostrar que dichas superficies no actuarán como reflectores pasivos que distorsionen las señales de los siguientes sistemas:

- **VOR (Very High Frequency Omnidirectional Range):** Analizar si la reflexión de la señal VOR sobre los paneles puede crear trayectorias secundarias que, al ser recibidas por la aeronave, generen un error en el rumbo indicado (course deviation). El criterio de aceptación es que el error inducido no supere $\pm 1^\circ$ de desviación de rumbo (OACI Anexo 10, Vol. I).
- **ILS Localizador y Senda de Planeo:** Evaluar si las reflexiones sobre los paneles pueden distorsionar la estructura de los lóbulos del ILS, generando falsas indicaciones de desviación lateral o vertical en la aeronave. El análisis debe considerar la geometría de los paneles en relación con el haz del ILS y la zona de sensibilidad crítica definida en OACI Anexo 14.
- **Radar Primario (PSR):** Evaluar el potencial de los paneles para generar ecos secundarios (clutter) que puedan saturar la pantalla del operador del radar o generar pistas fantasma. El análisis debe incluir el cálculo de la Sección Transversal Radar (Radar Cross-Section – RCS) de los arreglos de paneles.

Referencias normativas para EMI

OACI Anexo 10 – Telecomunicaciones Aeronáuticas, Volumen I (Radionavegación); ICAO Doc 9051 – Electromagnetic Compatibility Manual; ICAO Doc 8071 – Manual de Pruebas de Radioayudas para la Navegación; CISPR 11 (Equipos industriales, científicos y médicos); IEC 61000-6-3 (Estándar de emisión genérica para entornos industriales); ITU-R P.526 (Propagación por difracción); ITU-R P.1546 (Método para servicios terrestres punto a área).

3.4 Resultados Esperados

El informe final del Estudio de Interferencia Electromagnética deberá incluir obligatoriamente:

- **Mapa de compatibilidad electromagnética:** Representación gráfica georreferenciada de la atenuación de las señales emitidas por la planta, mostrando las isolíneas de intensidad de campo para las frecuencias de cada radioayuda.
- **Tablas de cálculo de propagación:** Para cada par fuente-receptor, presentar: nivel de emisión de la fuente (dBμV/m), distancia, modelo de propagación aplicado, pérdidas calculadas, nivel estimado en la antena receptora y umbral de protección del sistema. Incluir el margen de seguridad resultante (en dB).

- **Análisis de Multipath:** Informe específico del análisis de reflexiones sobre los sistemas VOR, ILS, DME y PSR/SSR, con conclusiones cuantitativas sobre el error de navegación inducido.
- **Declaración de No Interferencia:** Conclusión técnica fundamentada, firmada por el profesional responsable, que establezca que no habrá degradación de las señales aeronáuticas como resultado de la instalación y operación de la planta fotovoltaica.
- **Archivos de simulación:** En caso de haberse utilizado software de simulación electromagnética, adjuntar los archivos fuente.

En caso de que el estudio detecte riesgo de interferencia, se deberá incluir un Plan de Mitigación que contemple, según corresponda:

- **Reubicación de equipos:** Traslado de inversores o subestaciones para aumentar la distancia y atenuación respecto de las antenas de radioayuda.
- **Blindaje electromagnético (Shielding):** Instalación de jaulas de Faraday o blindajes adicionales sobre los inversores o el cableado de la planta para reducir las emisiones radiadas.
- **Cableado subterráneo:** Soterramiento de la red eléctrica interna y de las líneas de evacuación en las zonas de mayor proximidad a las antenas, para reducir las emisiones conducidas y radiadas.
- **Filtros de armónicos:** Instalación de filtros de armónicos activos o pasivos a la salida de los inversores para reducir las emisiones en las bandas de frecuencia de las radioayudas.
- **Rediseño de la malla de tierra:** Optimización del sistema de puesta a tierra de la planta para minimizar las corrientes de modo común que actúan como fuente de emisión.

4. Entregables

Ambos estudios deberán ser presentados a la autoridad aeronáutica competente de acuerdo con los requisitos formales indicados a continuación:

Entregable	Formato	Observaciones
Informe Técnico de Reflectividad Solar	PDF firmado digitalmente	Debe incluir archivos de simulación en formato nativo del software utilizado.
Informe Técnico de Interferencia Electromagnética	PDF firmado digitalmente	Debe incluir tablas de cálculo y, si aplica, archivos de simulación.
Planos georreferenciados	DWG / SHP / KMZ	Planos de layout del parque con ubicación de radioayudas y zonas de protección.
Fichas técnicas y certificaciones	PDF	Fichas de módulos, inversores, trackers y transformadores.
Archivos de simulación	Formato nativo del software	SGHAT (.xlsx/.pdf), ForgeSolar, FEKO, CST, etc.



Firma y acreditación profesional

Los informes deberán ser firmados y validados por el profesional responsable o jefe/encargado del área competente, de acuerdo con sus funciones y ámbito de responsabilidad técnica, asegurando la correcta elaboración y validación de los antecedentes presentados.